

联合多分组接收和模糊逻辑控制功率策略

韩江洪¹, 胡松华^{1,2}, 刘斌¹, 陈振¹, 刘磊¹

(1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009; 2. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对无线网络节约能耗的要求, 提出了一种联合多分组接收和模糊逻辑控制功率策略, 采用串行干扰消除法, 根据无线节点的传输功率等级, 将功率等级划分为多分组接收能够正常解码的功率等级, 并以任一无线节点到邻接节点的距离、邻接节点的个数和无线节点的剩余能耗为模糊逻辑控制的输入参数来控制各无线节点的功率选择。仿真结果表明, 与现有的几种经典的基于功率控制的串行干扰消除算法方案相比, 联合多分组接收和模糊逻辑控制功率策略的无线网络具有更大的有效吞吐量及更长的生存时间。

关键词: 多分组接收; 串行干扰消除; 网络优化; 模糊逻辑控制

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

Power control strategy with joint of multi-packet reception and fuzzy logic control

HAN Jiang-hong¹, HU Song-hua^{1,2}, LIU Bin¹, CHEN Zhen¹, LIU Lei¹

(1. School of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Electrical Engineering & Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to meet the needs of energy saving in wireless networks, a power control strategy with joint of multi-packet reception and fuzzy logic was proposed. Firstly, based on the power control with successive interference cancellation (SIC), transmission power was divided into several decodable power levels. Secondly, fuzzy logic control algorithm was adopted to select the optimal transmission power for SIC. In addition, three parameters were designed as fuzzy logic control inputs for power selection, which were the distance between transmitters and receivers, the number of neighboring nodes and the residual energy of transmitters. Simulation results show that power control strategy with joint of multi-packet reception and fuzzy logic control not only better average network throughput than other power control strategy for SIC, but also saves more energy so that the network lifecycle would be significantly extended.

Key words: multi-packet reception; successive interference cancellation; network optimization; fuzzy logic control

1 引言

近年来, 随着半导体技术的发展, 无线网络节点处理器芯片的计算能力和存储容量大大增强, 网络节点可以完成大部分的计算和执行实时决策算法。文献[1]给出的无线网络节点分析参数指出, 节点执行 3 百万条指令所消耗的能量与传输 100 m 距离的 1 KB 数据所消耗的能量相当, 因此, 在节点端进行强大的计算能力和信息处理是无线网络节

点发展的趋势。与此同时, 提高端到端网络节点的吞吐量一直是无线网络优化的热点问题^[2,3]。在不久的将来, 这两者的结合将大大加快网络优化算法在无线网络节点的实现。

在无线网络节点的众多网络优化算法中, 多分组接收技术的串行干扰消除算法可大大提高网络端到端节点的吞吐量已在许多已有的文献中讨论^[4-8], 文献[9]研究了在无线多跳网络, 联合反馈功率控制和串行干扰消除提高系统吞吐量的方法, 并指出在

收稿日期: 2013-10-14; 修回日期: 2014-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61370088); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100111110004)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61370088); Doctoral Fund of Ministry of Education of China(20100111110004)

无线网络节点实现 SIC 算法是一个 NP-hard 难题。文献[10]采用混合整数线性规划算法来最大化共享信道的信号与干扰噪声和之比(SINR, signal to interference and noise ratio), 文献[11]则采用定义一个微分链路权值和的跨层目标, 并提出了多项式时间近似算法来最大化信道 SINR, 文献[12]采用基于模糊逻辑传输功率控制(FTPC, fuzzy logic-based transmission power control)来对无线网络节点传输功率控制, 但没有应用多分组接收的串行干扰消除(SIC, successive interference cancellation)算法。文献[13]研究了各节点在不同 QoS 指标排序情况下, 线性完全 SIC 在 CDMA 网络的功率控制。文献[14]讨论了在 CDMA 网络, 不完全 SIC 算法下最优传输功率控制和解码顺序问题, 提高了网络吞吐量。文献[15]应用粒群优化算法对无线网络串行干扰消除算法进行优化功率控制。文献[16]应用宏分集和多用户检测的串行干扰消除对基于用户限制的蜂窝 CDMA 网络进行功率控制和性能分析。文献[17]研究了对随机接入网络的用户采用串行干扰消除算法进行分布式功率控制。通过查阅国内外最新文献, 诸多文献运用不同的方法对多分组接收的 SIC 算法进行功率控制, 但在多跳无线网络中, 联合 SIC 和模糊逻辑功率控制(FLC, fuzzy logic control)策略来最大化网络吞吐量的相关文献还没有出现, 故本文采用控制理论中的 FLC 来控制无线网络节点的传输功率控制, 联合 SIC 和 FLC 来实现网络节点的功率控制, 提高网络吞吐量, 延长网络生存时间。

2 系统模型

考虑多跳无线网络, 设节点为 N 个, 网络拓扑结构用有向图 $G=(N, L)$ 表示, $N = \{1, 2, \dots, N\}$, $L = \{1, 2, \dots, L\}$, 分别表示节点个数集合和链路集合。每条链路 $l \in L$ 对应一个有序对 (i, j) , $i \neq j$, $(i, j \in N)$ 。在多跳无线网络中, 则多分组接收分析可扩展为多源节点和多目的节点的多输入多输出(MIMO, multiple input multiple out)分析。设无线网络中源节点到目的节点经过多跳中继节点, 本文在这种情况下考虑无线网络端到端吞吐量最大化。

不失一般性, 设无线网络采用分时传输方案, 调度周期时间段为 T , 等分为 n 个时间片, 则每个节点占用时间片 $t = \frac{T}{n}$ 。在无线网络的传输模型中, 当节点 i 向节点 j 发送数据, 且被节点 j 成功接收,

则在节点 j 处需满足以下条件

$$s_{ij} = \frac{g_{ij} p_{ij}}{\sigma^2 + \sum_{k \in N, k \neq i, j} g_{kj} p_{kj}}, i, j, k \in N \quad (1)$$

其中, g_{ij} 为节点 i 到节点 j 的传输增益, p_{ij} 为传输功率, σ^2 为热噪声, g_{kj} 为其他节点传输到节点 j 的传输增益, $g_{ij} = (d_{ij})^{-\alpha}$, d_{ij} 表示节点 i 和 j 的距离, α 一般取 $2 \sim 4$ 。

若 $s_{ij} \geq \beta$, β 为 SINR 门限值, 节点 i 到节点 j 传输数据成功, 则获得的信道传输速率为

$$c_{ij} = W \ln(1 + s_{ij}), i \in N, j \in \Gamma_i \quad (2)$$

其中, W 为信号带宽, 其上限小于香农的极限传输速率。

本文在接收端 j 采用 SIC 算法, 接收端 j 可成功接收并解码发送端 i 发送的数据。SIC 的工作原理如图 1 所示, 假设 $N-1$ 个发送端在接收端 j 的接收功率大小为 $P_{1j} \leq P_{2j} \leq \dots \leq P_{(N-1)j}$, 只要满足以下条件

$$\begin{aligned} \text{step1} \quad & \frac{P_{(N-1)j}}{\sum_{k=1}^{k=N-2} P_{kj} + \sigma^2} \geq \beta \\ \text{step2} \quad & \frac{P_{(N-2)j}}{\sum_{k=1}^{k=N-3} P_{kj} + \sigma^2} \geq \beta \\ & \vdots \\ \text{step}(N-i) \quad & \frac{P_{ij}}{\sum_{k=1}^{k=i-1} P_{kj} + \sigma^2} \geq \beta, 1 \leq i \leq N-1 \end{aligned} \quad (3)$$

则接收端节点 j 从 $N-1$ 个发送端解码数据分组的顺序为 $N-1, N-2, \dots, 2, 1$ 。如式(3)所示, 为了解码接收功率 P_{ij} , SIC 首先解码最强信号功率, 然后将解码出来的最强功率信号从接收端信号中消除掉, 从余下的功率信号中再解码次强的信号功率(解码前的功率排序), 再将次强的功率信号从接收端信号中消除掉, 以此推之, 直至余下的接收端功率信号不满足条件为止。

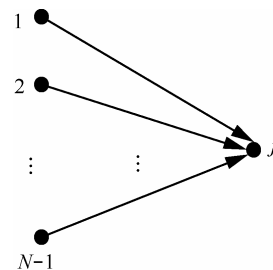


图 1 多个发送节点一个接收节点

定义一个二进制调度变量 $x_{ij}[t]$ 表示节点 i 到节点 j 在时隙 $t(1 \leq t \leq T)$ 的链路, 则

$$x_{ij}[t] = \begin{cases} 1, & \text{在时隙 } t \text{ 节点 } i \text{ 成功发送数据到节点 } j \\ 0, & \text{不成功} \end{cases}$$

Γ_i 为节点 i 的相邻节点集合, 对单播通信而言, 在一个时隙 t 时间内, 对发送端 i , 只有一个节点传输数据, 故

$$\sum_{j \in \Gamma_i} x_{ij}[t] \leq 1, i \in N, 1 \leq t \leq T \quad (4)$$

对接收端 j , 由于采用了 SIC 算法, 则 $\sum_{i \in \Gamma_j} x_{ij}[t] > 1$ 。

文献[6]给出了 SIC 算法接收端 j 成功译码信号个数的上限为 A_j , A_j 必须满足

$$A_j \leq 1 + \log_{(\beta+1)} \left(\frac{P_j^{\max}}{\beta\sigma^2} \right) \quad (5)$$

其中, $P_j^{\max} = P_{\max}$, 实际上, 由于有干扰的影响,

解码上限个数 A_j 远小于其上限值 $1 + \log_{(\beta+1)} \left(\frac{P_j^{\max}}{\beta\sigma^2} \right)$ 。

对式(5)进行简单变换, 则在 SIC 算法下, 节点传输功率 p_{ij} 需满足以下不等式

$$\beta\sigma^2(\beta+1)^{A_j-1} \leq p_{ij} \leq P_{\max} \quad (6)$$

为了满足 SIC 的条件, 节点传输功率 p_{ij} 只能在不等式(6)的范围内选择。文献[18]给出了在一般协议干扰模型下, 节点 i 成功传输数据到节点 j 的条件

$$p_{ij} \in \left[\left(\frac{d_{ij}}{R_T^{\max}} \right)^{\alpha} P_{\max} x_{ij}, P_{\max} x_{ij} \right], i \in N, j \in \Gamma_i \quad (7)$$

其中, d_{ij} 为节点 i 到节点 j 距离, R_T^{\max} 为节点的最大传输距离, P_{\max} 为节点的最大传输功率, α 为路径损耗指数, 设归一化的传输路径损耗 $g_{ij} = (d_{ij})^{-\alpha}$, 则

$$c_{ij} = W \text{lb} \left(1 + \frac{g_{ij} p_{ij}}{\sigma^2 + \sum_{k \neq i, j} g_{kj} p_{kj}} \right), i, j, k \in N \quad (8)$$

3 问题描述和节点 FLC 功率策略

3.1 问题描述

在 SIC 方案下, 为最大化端到端网络吞吐量, 综合式(6)和式(7), 可得满足 SIC 算法的节点传输功

率的选择范围为

$$p_{ij} \in [\beta\sigma^2(\beta+1)^{A_j-1}, P_{\max}], i \in N, j \in \Gamma_i \quad (9)$$

因此, 要想获得最大吞吐量网络性能, 讨论的模型可描述为 Π_{SIC}

Max

$$W \text{lb} \left(1 + \frac{g_{ij} p_{ij} x_{ij}[t]}{\sigma^2 + \sum_{k \neq i, j} g_{kj} p_{kj} x_{kj}[t]} \right), i, j, k \in N \quad (10)$$

Subject to

$$p_{ij} \in [\beta\sigma^2(\beta+1)^{A_j-1} x_{ij}, P_{\max} x_{ij}], i \in N, j \in \Gamma_i \quad (11a)$$

$$\sum x_{ij}[t] + \sum x_{kj}[t] \leq A_j, i \in N, 1 \leq t \leq T \quad (11b)$$

$$(d_{ij}^{-\alpha}) p_{ij} \geq (R_T^{\max})^{-\alpha} P_{\max} \quad (11c)$$

式(11a)是节点传输功率上下限约束条件, 从式(11a)可以看出, 节点的传输功率控制 p_{ij} 在一个范围内随机取值, 式(11b)是二元制调度模型, 但总数不能超过 SIC 解分组上限个数, 式(11c)是节点成功传输的传输功率距离条件。

3.2 计算复杂度分析

从目标函数式(10)可以看出最大化网络吞吐量是一个 NP-hard 难题^[9], 本文用凸逼近的方法对其计算复杂度进行分析。参考对数函数

$$\begin{cases} \text{alb}(z) + b \leq \text{lb}(1+z) \\ a = \frac{z_0}{1+z_0} \\ b = \text{lb}(1+z_0) - \frac{z_0}{1+z_0} \text{lb}(z_0) \end{cases} \quad (12)$$

该函数在 z_0 是紧致的, 当 $z_0 \rightarrow \infty$ 时, 其上限为 $\text{lb}(z) \leq \text{lb}(1+z)$ 。令

$$\gamma_{ij} = \frac{g_{ij} p_{ij}}{\sigma^2 + \sum_{k \neq i, j} g_{kj} p_{kj}} \quad (13)$$

则式(10)和式(11)可写成

Max

$$\sum (a x_{ij}[t] \text{lb}(\gamma_{ij}) + b x_{ij}[t]), i, j, k \in N \quad (14)$$

Subject to

$$p_{ij} \in [\beta\sigma^2(\beta+1)^{A_j-1} x_{ij}, P_{\max} x_{ij}], i \in N, j \in \Gamma_i \quad (15a)$$

$$\sum x_{ij}[t] + \sum x_{kj}[t] \leq A_j, i \in N, 1 \leq t \leq T \quad (15b)$$

$$(d_{ij}^{-\alpha})p_{ij} \geq (R_T^{\max})^{-\alpha} P_{\max} \quad (15c)$$

式(14)仍是凹函数, 注意到有

$$\text{lb}(\gamma_{ij}) = \text{lb}(g_{ij}p_{ij}) - \text{lb}(\sigma^2 + \sum_{k \in N, k \neq i, j} g_{kj}p_{kj}) \quad (16)$$

定义对数变量

$$\hat{p}_{ij} = \text{lb}(p_{ij}) \quad (17)$$

$$\text{lb}(\gamma_{ij}) = \hat{g}_{ij} + \hat{p}_{ij} - \text{lb}(\sum_{k \in N, k \neq i, j} e^{\hat{g}_{kj} + \hat{p}_{kj}} + e^{\hat{\sigma}^2}) \quad (18)$$

其中, $\hat{g}_{kj} = \text{lb}(g_{kj})$, $\hat{\sigma}^2 = \text{lb}(\sigma^2)$ 。根据优化功率 $\{\hat{p}_{ij}\}$, 最终优化问题转化为

$$\begin{aligned} \text{Max } & \hat{p}_{ij} \\ \text{Sum } & (ax_{ij}[t](\hat{g}_{ij} + \hat{p}_{ij} - \text{lb}(\sum_{k \in N, k \neq i, j} e^{\hat{g}_{kj} + \hat{p}_{kj}} + e^{\hat{\sigma}^2}))) + \\ & bx_{ij}[t], i, j, k \in N \end{aligned} \quad (19)$$

Subject to

$$p_{ij} \in [\beta\sigma^2(\beta+1)^{A_j-1}x_{ij}, P_{\max}x_{ij}], i \in N, j \in \Gamma_i \quad (20a)$$

$$\sum x_{ij}[t] + \sum x_{kj}[t] \leq A_j, i \in N, 1 \leq t \leq T \quad (20b)$$

$$(d_{ij}^{-\alpha})p_{ij} \geq (R_T^{\max})^{-\alpha} P_{\max} \quad (20c)$$

式(19)中的目标函数是凹形的, 而 $ax_{ij}[t]$ 和 $bx_{ij}[t]$ 是常数, 不等式(20)是凸形的, 指数函数的对数和是凸形的。因此, 在为凹函数寻求凸可行集的前提下, 优化问题(19)和(20)是凸形的。变量对数变换是几何规划问题, 严格上说, 优化问题(18)和(19)是扩展几何规划问题, 应用牛顿迭代算法可求得其问题的凸逼近解。文献[19]指出, 采用牛顿迭代算法寻求凸逼近的最坏情况的复杂度是 $O(L^{3.5})$, L 是可行的链路数, 在节点密度很高的网络, 一般有 $L = O(N^2)$, 故最坏情况的复杂度为 $O(N^7)$, 这看起来很高复杂度, 但即使是解关于链路 L 的传输功率方程, 也接近到 $O(N^6)$, 因此, 凸逼近的计算复杂度还是可接受的。

控制理论的模糊逻辑控制是解决复杂优化问题的常用数学工具, 本文采用控制理论中的 FLC 来控制传输功率。

3.3 传输功率 FLC 策略

设网络中每一个无线网络节点有 X 个功率等级, 则将式(19)的 p_{ij} 均分为 X 级, 则式(19)最大化网络吞吐量问题就转化为传输功率选择的优化问题, 在综合

考虑每个无线网络节点剩余能量 E_i 、与邻居节点的距离 d_i 和节点 i 的邻接节点 ADN_i 的条件下

$$\text{Optimize } C_i P_{\max}, i = 1, \dots, n \quad (21)$$

其中, C_i 为参数, 由 E_i 、 d_i 和 ADN_i 根据 FLC 算法确定^[20,21]。

设节点传输功率控制调节过程也以 T 为周期, 每个周期可以用轮(round)的概念来描述。在网络建立阶段, 所有无线节点发送当前节点能量、位置、距离等信息给相邻节点。基于这些信息, 通过 FLC 算法为每个节点定义 3 个参数, 分别为 E_i 、 d_i 和 ADN_i , 并为每个参数分配成员隶属函数, 各节点在收到邻居节点的返回报文后通过 FLC 来计算参数 C_i , 如图 2 所示。

图 2 所示是典型的模糊控制, 在图中, 模糊化接口映射每个输入参数到合适的语言学术语, 称为模糊集。

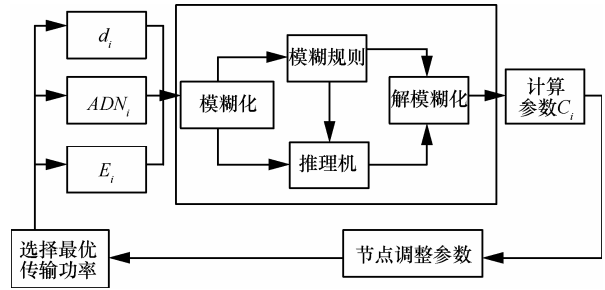


图 2 FLC 功率控制策略

本文 FLC 采用三角形隶属函数、梯形隶属函数和高斯隶属函数, 其数学表达式分别为

$$f(x; a, b, c) = \max(\min(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}), 0) \quad (22)$$

$$f(x; a, b, c, d) = \max(\min(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}), 0) \quad (23)$$

$$f(x; \delta, c) = \exp(\frac{-(x-c)^2}{2\delta^2}) \quad (24)$$

式(22)~式(24)分别对应于 3 个模糊逻辑控制参数剩余能量 E_i 、距离 d_i 和 ADN_i 的“Low”、“Medium”和“High”的隶属函数。

在图 2 中, 模糊逻辑控制参数 C_i 的输入变量有 3 个, 下面给出 3 个参数的模糊化定义。

1) 节点与 BS 距离 d_i : 距离 d_i 语言变量的集合分为 3 个等级: 远(far)、中等(middle)、近(near)、 $d_i = \{\text{far}, \text{middle}, \text{near}\}$, 定义 d_i 的论域为

$$d = \{\frac{R_T^{\max}}{3}, \frac{2R_T^{\max}}{3}, R_T^{\max}\}。$$

2) 邻接节点 ADN_i : ADN_i 数量语言变量集合分为 3 个等级：少(little)、中等、多(much), $ADN_i = \{\text{little}, \text{middle}, \text{much}\}$, 定义 ADN_i 的论域为

$$ADN = \left\{ \frac{A_j}{3}, \frac{2A_j}{3}, A_j \right\}.$$

3) 剩余能量 E_i : 每轮节点的剩余能量语言变量分为 3 个等级：低(low)、中等、高(high)。剩余能量是节点功率控制最重要的因素, $E_i = \{\text{low}, \text{middle}, \text{high}\}$, 定义 ADN_i 的论域为 $E = \left\{ \frac{E_0}{3}, \frac{2E_0}{3}, E_0 \right\}$, E_0 为无线节点初始能量。

输出控制参数 C_i : 综合考虑模糊语言的分档以及规则表的规模, 参数 C_i 语言变量的集合划分为 5 个等级：非常小(very small)、小(small)、中等(medium)、大(big)、非常大(very big)

$C_i = \{\text{very small}, \text{small}, \text{medium}, \text{big}, \text{verybig}\}$, 定

义 C_i 的论域为 $C = \left\{ \sum_{i=1}^X \frac{i}{X} \right\}$ 。

三维模糊控制器的控制规则 R_k 可表示为

R_k : if d_i, ADN_j, E_l then C_{ijl} , $i, j, l = 1, 2, 3$

用模糊关系表示

$$R = \bigcup_k d_i \otimes ADN_j \otimes E_l \otimes C_{ijl} \quad (25)$$

R 的隶属函数为

$$\mu_R(d, ADN, E) = \bigvee_{\substack{i=3; j=3; l=3 \\ i=1; j=1; l=1}} \mu_{d_i}(d) \wedge \mu_{ADN_j}(ADN) \wedge \mu_{E_l}(E) \wedge \mu_{C_{ijl}}(C) \quad (26)$$

根据 max-min 模糊推理合成规则求出控制量

$$C = (d \otimes ADN \otimes E) \oplus R \quad (27)$$

C 的隶属函数可表示为

$$\mu_C(C) = \bigvee_{\substack{d_i \in d \\ ADN_j \in ADN \\ E_l \in E}} \mu_R(d, ADN, E) \cdot \wedge [\mu_{d_i}(d) \wedge \mu_{ADN_j}(d) \wedge \mu_{E_l}(E) \wedge \mu_{C_{ijl}}(C)] \quad (28)$$

式(25)~式(28)中, \vee 表示 max, \wedge 表示 min, \otimes 表示叉积, \oplus 表示模糊推理, 模糊规则库由专家知识应用、控制目标和模糊数据作为基本规则库控制。在本文方法中, 其模糊逻辑推理规则采用 Mandani 推理方式, 利用模糊关系语言 “if X and Y then Z”, 模糊数据库 FLC 规则共产生 $3 \times 3 \times 3$ 条模糊规则, 如表 1 所示。

表 1		模糊规则		
rules	d_i	E_i	ADN_i	C_i
1	far	low	little	big
2	far	low	middle	medium
3	far	low	much	very big
4	far	middle	little	big
5	far	middle	middle	medium
6	far	middle	much	very big
7	far	high	little	medium
8	far	high	middle	big
9	far	high	much	very big
10	medium	low	little	small
11	medium	low	middle	medium
12	medium	low	much	big
13	medium	middle	little	small
14	medium	middle	middle	medium
15	medium	middle	much	big
16	medium	high	little	small
17	medium	high	middle	big
18	medium	high	much	very big
19	near	low	little	very small
20	near	low	middle	small
21	near	low	much	big
22	near	middle	little	very small
23	near	middle	middle	small
24	near	middle	much	big
25	near	high	little	small
26	near	high	middle	medium
27	near	high	much	big

推理机是 FLC 一种决策机制, 控制模糊变量并推导模糊规则。包含模糊规则不同度的模糊化输入变量, 利用模糊规则获得单一的值。解模糊化是将模糊控制规则转化为控制信号, 采用极小算子(min)作为 T 范式来进行模糊集合的联合运算, 得到输出变量 C_i 的模糊集合, 采用式(29)所示的质心法来进行解模糊化, 得到精确输出 C_i 的值。

$$C_i = \frac{\sum_{i=1}^n u_i U_i}{\sum_{i=1}^n u_i} \quad (29)$$

3.4 联合 SIC 和 FLC 节点功率控制算法

3.4.1 算法流程

步骤 1 在初始周期 T , 初始化每个无线节点, 每个节点与其相邻节点交互信息, 确定最大传输功率 P_{\max} 和最大传输距离 R_T^{\max} , 构建节点剩余 E_i 、 d_i 、 ADN_i 表, 确定基于 SIC 传输功率的取值范围, 并

根据节点功率等级 X ，对相邻节点的传输功率控制参数 C_i 赋初始值。

步骤 2 在时隙 t ，某节点 x_i 向邻近节点 x_j 传输数据时，节点 x_i 运行 FLC 算法，动态调整传输功率控制参数 C_i ，以 $C_i P_{\max}$ 的传输功率发送数据到 x_j 。

步骤 3 在每轮传输周期 T 结束后，每个无线节点更新节点状态信息。

步骤 4 如果某无线节点 x_i 在一定时限内没收到相邻节点发送的交互信息，则更新自己的 ADN_i 表，表明该邻居节点已经死亡。

步骤 5 若某无线节点 x_i 剩余能量 E_i 已耗尽 99%，则发送邻居节点交互信息，表明 x_i 节点已经死亡。

3.4.2 算法规模和有效性分析

随着无线网络节点增加，对多跳无线网络，中心节点仍然以预置的发射功率在一跳通信范围内广播邻居发现消息，消息中包含节点的 ID 和当前剩余能量。中心节点接收到邻接节点消息后，根据接收信号的强度 RSSI 估算邻接节点到自身的近似距离，并从消息中提取出相关信息，建立邻接节点信息表，包括 E_i 、 d_i 、 ADN_i 信息。因此，联合 SIC 和 FLC 节点功率控制算法只是增加了邻接节点的个数，即增加了邻接节点信息表的长度。根据式(5)，SIC 算法同时接收数据分组和解码数据分组的个数只与接收节点的阈值 β 和节点传输功率 p_{ij} 有关，算法可以正常运行。中心节点的邻接节点信息表中邻接节点当前剩余能量会随着邻接节点收发数据的能量消耗而变化，需要及时更新。可以将节点的剩余能量信息附在数据后面发送，其他收或侦听到数据的节点更新有关该节点的能量信息。由于外界因素的影响及无线链路的不稳定性，链路会发生时断时续的情况，因此以 Hello 消息周期性地通告节点的存在性，可以在 Hello 消息中增加节点的剩余能量信息。根据算法流程步骤 5，当某无线节点的剩余能量小于初始能量的 1% 时，说明该节点已经死亡，则其中心节点在一定时限内未收到该节点的交互信息，拓扑结构改变，中心节点更新自己的邻接节点信息表。

4 数值仿真

考虑如图 3 所示的无线网络节点分布，在以

$R = 50 \text{ m}$ 的环形区域随机分布 20 个无线节点，将无线节点的功率等级设为 $X = 5$ ，则传输功率的等级分为 5 级，将最大传输 R_T^{\max} 均分为离中心节点距离分别为 10 m、20 m、30 m、40 m、50 m 的环形区域中，任取随机分布于环形区域中的 6 个节点，其中 1 个节点为中心节点，其余 5 个节点为中心节点相邻的 5 个邻接节点，分别为 node1、node2、node3、node4、node5。为了体现距离与传输功率的关系，5 个邻接节点的设置是以中心节点为圆心的 5 个圆环内，环半径为 10 m，每个圆环内取一个邻接节点。仿真参数的设置如表 2 所示。则节点符合 SIC 限制条件的最小传输功率 P_i 与 SINR 之值 β 间的关系如图 4 所示，从图 4 中可以看出，当多分组接收的 SIC 阈值从 0 到 1 递增时，根据式(6)可求得最小传输功率逐渐增大，符合理论分析的结果，即要想获得高信干比，必须增大传输功率。同时随着 β 值的变化，要满足 SIC 限制条件且中心节点能正常解码出所接收的数据分组的传输功率必须大于等于 P_i 的功率值。

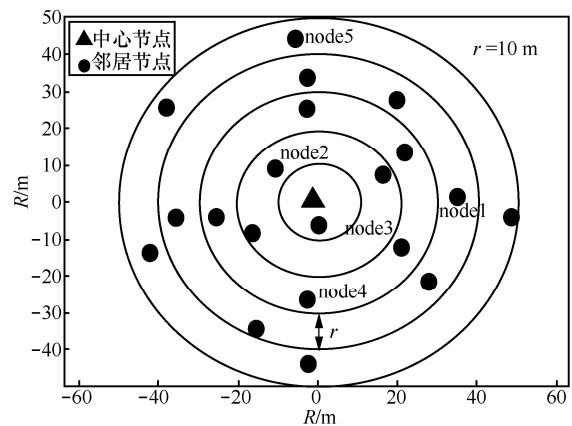


图 3 无线网络节点分布

表 2 仿真参数设置

参数名	参数描述	参数值
N	节点个数	6
P_{\max}	节点最大传输功率	0.1 W
σ^2	热噪声	0.000 1 W
β	SINR 门限	1
α	路径损耗指数	3
X	传输功率等级	5
R_T^{\max}	最大传输功率所对应的传输半径	50 m

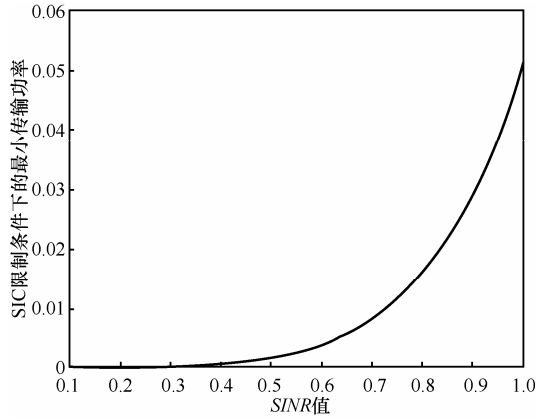


图 4 传输功率 P_t 与 β 关系 ($\delta^2 = 0.0001$)

设无线节点初始能量为 10 J。根据式(11a)，则满足 SIC 算法计算出各节点传输功率的范围为 [0.0512 W, 0.1 W]。为了描述采用联合 SIC 算法和 FLC 功率控制策略的效果，采用 NS2 软件进行仿真，为了真实模拟无线节点发送和接收数据分组的处理过程，NS2 仿真需要设置传输功率、接收功率、空闲功率、转换功率和转换时间等参数。参照文献 [22]，因网络规模和仿真节点数不同，本文 NS2 仿真参数设置如表 3 所示。

表 3 NS2 仿真实验中的参数设置

参数	参数值
节点个数	6(1 core node, 5 neighboring node)
最大传输距离/m	50
流量类型	CBR(time:1~960 s, packetsize:512 bit, interval:0.1 s)
传输功率等级	5
节点初始能量/J	10
接收功率/W	0.001
空闲功率/W	0.000 5
睡眠功率/W	0
睡眠/空闲转换功率/W	0.000 1
睡眠/空闲转换时间/s	0.005
最大传输功率/W	0.1
仿真时间/s	960

本文的 FLC 功率控制(FLC-SIC)采用的传输功率如表 4 所示。经过 960 s 的仿真时间，连续仿真 3 次，每次统计 node1 到 node5 的剩余能量总和，除以节点总数，最后求 3 次平均值求出节点剩余能量的平均值，FLC-SIC 的节点平均剩余能量与其他几种功率控制 SIC 策略 PCMDS- ISIC^[14]、PC-MUD-SIC^[16]、DPCRA-SIC^[17]的节点平均剩余能

量对比如图 5 所示，从图 5 中可以看出，PCMDS-ISIC 功率控制 SIC 策略的节点能量消耗最快，节点平均剩余能量最少，PC-MUD-SIC 功率控制 SIC 策略次之，接下来是 DPCRA-SIC 功率控制 SIC 策略，而 FLC-SIC 比其他各种功率控制策略更能节约节点的能量，在仿真时刻 800 s 时，PCMDS-ISIC、PC-MUD-SIC、DPCRA-SIC 功率控制 SIC 策略节点平均剩余能量分别为 0.048 J、0.054 J 和 1 J，而 FLC-SIC 剩余能量高达 2.2 J，可以预见，随着网络规模的扩大，FLC-SIC 将节约更多的节点剩余能量，仿真实验结果表明，FLC-SIC 比其他功率控制策略更能节约节点能量，延长网络的生存时间。

表 4 FLC-SIC 功率设置 (最大传输距离 $R=50$ m)

R/m	无线节点	C_i 取值范围	FLC-SIC/W
10	node1	$0 \leq C_i < 0.2$	0.051 2
20	node2	$0.2 \leq C_i < 0.4$	0.063 4
30	node3	$0.4 \leq C_i < 0.6$	0.075 6
40	node4	$0.6 \leq C_i < 0.8$	0.087 8
50	node5	$0.8 \leq C_i < 1$	0.1

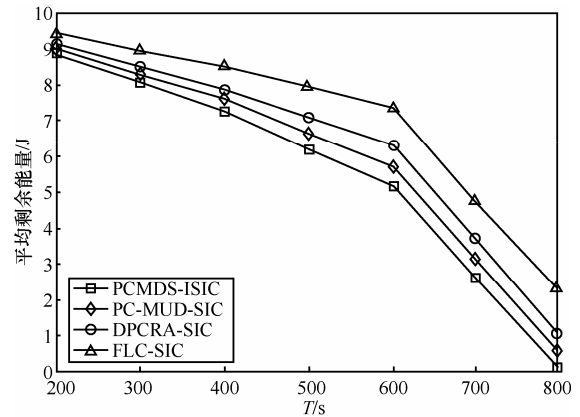


图 5 节点平均剩余能量

平均网络吞吐量也是网络性能的另一个重要指标，NS2 仿真参数见表 2，经过 960 s 的仿真时间，连续仿真 3 次，每次统计网络吞吐量，最后求 3 次平均值得出平均网络吞吐量，各种功率控制 SIC 策略和 FLC-SIC 功率控制的平均网络吞吐量仿真结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出，由于节点持续发送数据分组，网络的吞吐量都较高，其中最小的 PCMDS-ISIC 功率控制 SIC 策略的网络平均吞吐量也达到 25.8 kbit/s，PC-MUD-SIC 和 DPCRA-SIC 功率控制 SIC 策略的网络平均吞吐量依次增大。从图 6 中可以看出，在仿真过程中，5 个邻接节点同时

在 $interval=0.1$ s 的时间间隔内持续向中心节点发送流量数据分组, PC-MUD-SIC、PCMDS-ISIC 和 DPCRA-SIC 3 种功率控制策略的处理过程有时间的差异, 所以随着仿真时间的持续进行, 吞吐量会出现上下波动的情形。同时, 由于 NS2 仿真过程是动态的, 与机器在仿真时刻的资源有关, 即使采用相同的仿真参数设置, 每次仿真的数据结果也是有差异的。为了减小误差, 本文仿真 3 次取平均值, 但仍然出现 PC-MUD-SIC、PCMDS-ISIC 和 DPCRA-SIC 3 种功率控制策略的平均网络吞吐量随仿真时间出现了波动。而 FLC-SIC 功率控制策略比其他功率控制策略的平均吞吐量得到大大提高, 达到 27.5 kbit/s, 比最小的 PCMDS-ISIC 功率控制策略的平均吞吐量提高约 6.5%, 原因是由于采用联合多分组接收的 SIC 算法和节点传输功率 FLC 策略, FLC-SIC 对传感器节点按节点距离进行功率分级控制, 减小了冲突, 节点并发接收数据分组, 使平均网络吞吐量大大高于其他几种现有方案, 提高了网络性能。

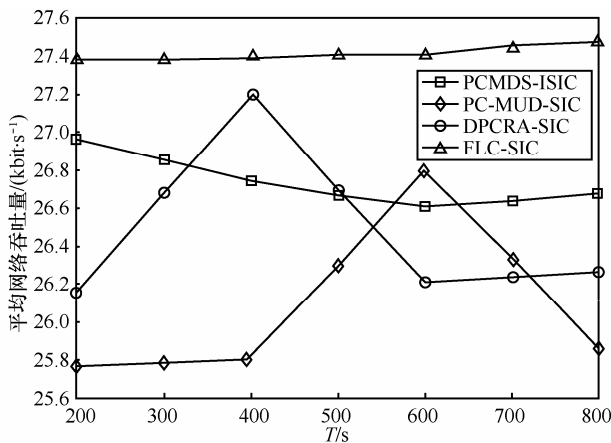


图6 平均网络吞吐量对比

5 结束语

本文的主要工作是研究在物理层多分组接收技术 SIC 算法和最大化网络吞吐量的前提下, 根据无线节点的传输功率等级, 联合 SIC 和 FLC 功率控制策略, 将无线网络节点的传输功率划分为若干个功率等级, 将无线网络节点传输功率模糊逻辑控制选择。本文给出了较为详细的功率选择计算公式, 用模糊逻辑控制的方法给出了优化的参数设计方法求得最优的发射功率选择, 仿真实验验证了该 FLC-SIC 功率控制策略可以大大节约节点能耗, 提

高网络吞吐量, 延长网络的生存时间, 对于指导实际的无线网络优化具有较好的指导意义。

参考文献:

- [1] POTTIE G, KAISER W. Wireless integrated network sensors[J]. Communications of the ACM, 2000, 43(5):51-58.
- [2] LIN X, SHROFF N B. The impact of imperfect scheduling on cross-layer congestion control in wireless networks[J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2006, 14(2): 302-315.
- [3] JOO C, LIN X, SHROFF N B. Performance limits of greedy maximal matching in multi-hop wireless networks[A]. Proc of 2007 46th IEEE Conference on Decision and Control[C]. New Orleans, LA, USA, 2007. 1128-1133.
- [4] WANG Z, SADJADPOUR H R, GARCIA-LUNA-ACEVES J J. The capacity and energy efficiency of wireless ad hoc networks with multi-packet reception[A]. Proc of ACM MobiHoc'08[C]. Hongkong, 2008. 26-30.
- [5] 殷作亮, 毛兴鹏, 张钦宇等. 实现 MIMO 系统串行干扰消除迫零检测的快速递归算法[J]. 通信学报, 2012,33 (7):67-74.
YIN Z L, MAO X P, ZHANG Q Y, *et al.* Fast recursive algorithm for implementation of MIMO ZF-SIC detection[J]. Journal on Communications, 2012, 33 (7):67-74.
- [6] JIANG C, SHI Y, HOU Y T, *et al.* Squeezing the most out of interference: An optimization framework for joint interference exploitation and avoidance[A]. Proc of IEEE INFOCOM[C]. Orlando, FL, USA, 2012. 424-432.
- [7] LU S, ZHUANG W, WANG X, *et al.* Scheduling in wireless ad hoc networks with successive interference cancellation[A]. Proc of IEEE INFOCOM[C]. Shanghai, China, 2011.1282-1290.
- [8] SHI Y, HOU Y T, LIU J. How to correctly use the protocol interference model for multi-hop wireless networks[A]. Proc of MobiHoc'09[C]. New Orleans, Louisiana, USA, 2009, 239-248.
- [9] GOPALAKRISHNAN B, SIDIROPOULOS N D. Joint back-pressure power control and interference cancellation in wireless multi-hop networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013,12(7): 3484-3495.
- [10] KARIPIDIS E, YUAN D, LARSSON E G. Mixed-integer linear programming framework for max-min power control with single-stage interference cancellation[A]. Proc of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)[C]. Prague, Czech Republic, 2011.3448-3451.
- [11] SHI Q, RAZAVIYAYN M, LUO Z Q, *et al.* An iteratively weighted MMSE approach to distributed sum-utility maximization for a MIMO interfering broadcast channel[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2011, 59(9): 4331-4340.
- [12] SABITHA R, THYAGARAJAN T. Fuzzy logic-based transmission power control algorithm for energy efficient MAC protocol in wireless sensor networks[J]. Journal of Communication Networks and Distributed Systems, 2012, 9(3):247-265.
- [13] MOHAMMAD M, BUEHRER R M. The effects of ordering criteria in linear successive interference cancellation in CDMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(11):4128-4131.
- [14] JALALI S, KHALAJ B H. Power control for multi-rate DS-CDMA systems with imperfect successive interference cancellation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57 (1): 600-603.
- [15] ZIELINSKI K, WEITKEMPER P, LAUR R, *et al.* Optimization of power allocation for interference cancellation with particle swarm op-

- timization[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2008, 13(1): 128-150.
- [16] NG D W K, LAU V K N. Power control and performance analysis of outage-limited cellular network with MUD-SIC and macro-diversity[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58 (9):2734- 2740.
- [17] XU C B, PING L, WANG P, *et al.* Decentralized power control for random access with successive interference cancellation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(11): 2387-2396.
- [18] SHI Y, HOU Y T. Optimal power control for multi-hop software defined radio networks[A]. *Proceedings of IEEE INFOCOM[C]*. Anchorage, AL, USA, 2007.1694-1702.
- [19] LUO Z Q, YU W. An introduction to convex optimization for communications and signal processing[J]. *Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(8): 1426-1438.
- [20] CHEN Y L, LIN Y S, WANG J W, *et al.* Adaptive fuzzy based rate management and power control in multimedia CDMA cellular systems[J]. *Computer Communications*, 2008, 31(10):1901-1910.
- [21] CHEN Y L, LIN Y S, WANG J W, *et al.* Combined fuzzy based power control with window-based transmission rate management in multimedia CDMA cellular systems[J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2011, 65(4): 377-383.
- [22] 李方敏, 徐文君, 高超. 一种适用于无线传感器网络的功率控制 MAC 协议[J]. *软件学报*, 2007, 18 (5):1080-1091.
- LI F M, XU W J, GAO C. A power control MAC Protocol for wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2007, 18 (5) :1080-1091.

作者简介:



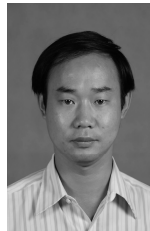
韩江洪 (1954-), 男, 江苏南京人, 合肥工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为安全关键工业控制、无线传感网、网络通信等。



胡松华 (1976-), 男, 湖南邵阳人, 合肥工业大学博士生, 河南理工大学讲师, 主要研究方向为无线网络优化、功率控制。



刘斌 (1975-), 男, 山东郓城人, 合肥工业大学博士生, 主要研究方向为无线通信、无线网络优化。



陈振 (1980-), 男, 安徽安庆人, 合肥工业大学博士生, 主要研究方向为智能控制。



刘磊 (1982-), 男, 安徽合肥人, 合肥工业大学博士生, 主要研究方向为压缩感知理论、无线传感器网络定位、汽车电子。