

引用格式:蒋华,王瑶,王慧娇,等. 基于模糊逻辑的 WSNs 能量高效分簇路由算法[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(7): 25-30. [JIANG H, WANG Y, WANG H J, et al. Energy efficient clustering routing algorithm in WSN based on fuzzy logic[J]. Microelectronics & Computer, 2020, 37(7): 25-30.]

基于模糊逻辑的 WSNs 能量高效分簇路由算法

蒋 华^{1,2}, 王 瑶¹, 王慧娇^{1,2}, 王 鑫¹

(1 桂林电子科技大学 计算机信息与安全学院, 广西 桂林 541004;

2 桂林电子科技大学 广西可信软件重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 针对无线传感器网络节点能量消耗不均衡导致其生命周期缩短的问题, 运用模糊理论提出一种非均匀分簇路由算法, 并根据节点能耗值确定网络最佳簇首数. 在簇首选举时采用模糊逻辑推理系统, 结合节点剩余能量、相对距离和理想簇区域内的邻居节点数并考虑网络最佳簇首数推理得到节点成为簇首的概率及簇首的竞争半径. 成簇完成后, 簇首将数据直接发送给基站或通过中继节点进行转发. 仿真实验表明: 改进算法有效地均衡了网络能耗, 提高了能量利用率, 延长了网络生命周期.

关键词: 模糊逻辑; 能耗高效; 非均匀分簇; 无线传感器网络

中图分类号: TP212.9/TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2020)07-0025-06

Energy efficient clustering routing algorithm in WSN based on fuzzy logic

JIANG Hua^{1,2}, WANG Yao¹, WANG Hui-jiao^{1,2}, WANG Xin¹

(1 College of Computer Information and Security, Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin 541004, China; 2 Guangxi Key Laboratory of Trusted Software, Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Aiming at the problem that the life time of wireless sensor network is shortened due to the unbalanced energy consumption of nodes, a non-uniform clustering routing algorithm is proposed based on fuzzy theory. The optimal number of cluster heads is determined according to the energy consumption of nodes. By using the fuzzy system and the optimal number of cluster heads, the probability of the node becoming the cluster head and the competition radius of the cluster head are deduced by combining the residual energy, relative distance and the number of neighbor nodes in the ideal cluster area. After clustering, the cluster head sends the data directly to the base station or forwards it through the relay node. Simulation results show that the improved algorithm can effectively balance the network energy consumption, improve the energy efficiency and extend the network life time.

Key words: fuzzy logic; energy efficient; clustering; wireless sensor network

1 引言

无线传感器网络具有成本低、组建方式自由和可靠性高等优势, 被广泛应用于军事、工业、农业各

个社会领域^[1]. 由于传感器节点体积小、能量有限, 若被部署在恶劣环境下, 极其不易更换. 因此如何延长无线传感器网络的生命期是无线传感器网络研究的核心内容之一^[2].

LEACH^[3]是无线传感器网络分簇协议中经典的协议,按轮随机选举簇首导致网络能量利用率低下.在此协议的基础上,Bagci H^[4]等人提出EAUCF算法,基于节点剩余能量和距基站的距离利用模糊系统计算竞争半径,但忽视了节点度的影响.Mahnaz^[5]等人在设计普通节点入簇的方法时,利用模糊系统优先选择能量高,邻居节点数多的簇首,但仍采用的是随机选举簇首机制.Abidi W^[6]等人选择能量高的节点参与簇首竞争,同时基于模糊系统对簇首选择方法进行了优化,但未对簇半径做出限制.

本文针对无线传感器网络能耗不均衡的问题,结合模糊理论提出了一种能量高效的无线传感器网络非均匀分簇路由算法(Unequal clustering algorithm base on fuzzy logic,NCFL).NCFL算法优先选择能量高、地理位置优的节点作为簇首,从而有效地均衡网络能耗.

2 系统模型

假设 N 个节点构成 K 个簇,随机分布在半径为 R 的监测区域中, N_0 个节点担任中继节点,如图1所示,黑色节点代表普通节点,灰色节点代表中继节点,白色节点代表簇首节点.监测区域以基站为中心划分为若干个环宽相等的环境区域.传感器节点部署后位置固定,依靠电池供电.基站位置固定,能量充足.节点初始能量、计算能力相同.每个节点可以获取自身当前能量,可通过收到信号的强弱计算距其它节点及基站的距离^[7].

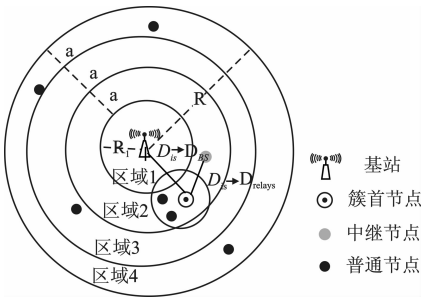


图1 网络模型图

3 确定网络最佳簇首数

簇首数目对网络生存时间有着非常重要的影响.本文采用文献^[8]中的能耗模型计算网络能耗以确定最佳簇首数.

在簇建立时,簇首节点向其它节点广播成簇信息、接受成员节点入簇、向其它节点广播 TDMA 表

的能量消耗^[9]为:

$$\begin{aligned} E_{CH1} &= E_{CH-broad} + E_{CH-cluster} + E_{CH-TDMA} \\ &= n(E_{elec} + \epsilon_{fs}d^2) + n\left(\frac{N-N_0}{K} - 1\right)E_{elec} \\ &\quad + n(E_{elec} + \epsilon_{fs}d_{toCH}^2) \end{aligned} \quad (1)$$

普通节点接收簇首广播信息、接收簇首 TDMA 表、向簇首节点发送入簇信息的能量消耗为:

$$\begin{aligned} E_{normal1} &= E_{normal-accept} + E_{normal-TDMA} + E_{normal-cluster} \\ &= 2nE_{elec} + n(E_{elec} + \epsilon_{fs}d_{toCH}^2) \end{aligned} \quad (2)$$

则建立簇时网络的能量消耗为:

$$\begin{aligned} E_{cluster} &= KE_{CH1} + (N - N_0 - K)E_{normal1} \\ &= (4N - 4N_0 - 2K)nE_{elec} + Kn\epsilon_{fs}d^2 \\ &\quad + (N - N_0)n\epsilon_{fs}d_{toCH}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

在数据传输时簇首节点接收数据和发送数据的能量消耗为:

$$\begin{aligned} E_{CH2} &= E_{CH-accept} + E_{CH-send} \\ &= n\left(\frac{N-N_0}{K} - 1\right)E_{elec} + n(E_{elec} + \epsilon_{fs}d_{next}^2) \end{aligned} \quad (4)$$

普通节点发送数据的能量消耗为:

$$E_{normal2} = E_{normal-send} = n(E_{elec} + \epsilon_{fs}d_{toCH}^2) \quad (5)$$

则数据传输时网络的能量消耗为:

$$\begin{aligned} E_{trans} &= KE_{CH2} + (N - N_0 - K)E_{normal2} \\ &= (2N - 2N_0 - K)nE_{elec} + Kn\epsilon_{fs}d_{next}^2 \\ &\quad + (N - N_0 - K)n\epsilon_{fs}d_{toCH}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

中继节点接收、发送数据的能量消耗为:

$$\begin{aligned} E_{relay} &= E_{relay-accept} + E_{relay-send} \\ &= 2N_0nE_{elec} + N_0n\epsilon_{fs}d_{toBS}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

则网络整体的能量消耗为:

$$\begin{aligned} E_{total} &= E_{cluster} + E_{trans} + E_{relay} \\ &\approx 6NnE_{elec} + Kn\epsilon_{fs}(d^2 + d_{next}^2) \\ &\quad + 2Nn\epsilon_{fs}d_{toCH}^2 + N_0n\epsilon_{fs}d_{BS}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

在理想情况下, K 个簇刚好可完全覆盖半径为 R 的监测区域,可得:

$$\pi^2 K = \pi R^2 \quad (9)$$

由公式(9)可得理想簇半径即成员节点到簇首节点的距离为:

$$d_{toCH} = r = \frac{R}{\sqrt{K}} \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)可得网络总能耗对簇首数的函数,对簇头数 K 进行一阶求导可得最佳簇首数 K 为

$$K = \sqrt{\frac{2R^2N}{d^2 + d_{next}^2}} \quad (11)$$

4 基于模糊逻辑的非均匀分簇路由算法

确立最佳簇首数后 NCFL 算法相继进行以下阶段:网络初始化阶段、中继节点选举阶段、簇建立阶段和数据传输阶段。

4.1 网络初始化阶段

在网络初始化阶段,基站向全网节点广播消息,节点根据自身距基站的距离进行所在环面区域确定,如公式(12)所示。

$$S = \begin{cases} 1, & R_0 \leq R_1 \\ \left\lceil \frac{R_0 - R_1}{a} \right\rceil + 1, & R_0 > R_1 \end{cases} \quad (12)$$

公式(12)中 R_0 代表节点距离基站的距离, R_1 为区域 1 的半径, a 代表圆环宽。

网络初始化后,进行中继节点的选举。

4.2 中继节点选举阶段

在中继节点选举阶段,所有节点向基站广播 Conv_Elect_Msg 报文,报文包含节点 ID,剩余能量 E ,区域号 R_{area} 信息。基站比较节点的剩余能量 E ,选择各个区域中剩余能量最高的节点作为该轮该区域的中继节点。中继节点选择完毕后,基站向所有节点广播中继节点信息。选举成功后的中继节点不再参与本轮的簇首选举。

4.3 簇建立阶段

簇建立阶段中的成簇机制对网络性能有着非常重要的影响。为了设计合理的成簇机制,以降低网络能耗,延长生命周期,本文选择节点的剩余能量、相对距离和理想簇内的邻居节点数三个参数作为成簇机制的依据:

(1)剩余能量 Energy:指节点的当前能量。节点的剩余能量越高,越不易死亡,则越适合担任簇首,所在簇规模也越大。

(2)相对距离 Distance:指节点 i 距基站或距中继节点的相对距离。

$$\text{Distance} = \begin{cases} \frac{(D_{i_s} \rightarrow D_{BS})}{R}, & (D_{i_s} \rightarrow D_{BS}) \leq (D_{i_s} \rightarrow D_{relay_s}) \\ \frac{(D_{i_s} \rightarrow D_{relay_s})}{R}, & (D_{i_s} \rightarrow D_{BS}) > (D_{i_s} \rightarrow D_{relay_s}) \end{cases} \quad (13)$$

公式(13)中, $D_{i_s} \rightarrow D_{BS}$ 表示区域 S 中节点 i 距基站的距离, $D_{i_s} \rightarrow D_{relay_s}$ 表示区域 S 中节点 i 距同区域中继节点的距离。相对距离越小,数据通信消

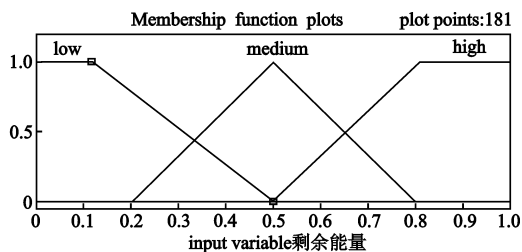
耗的能量越小,则越适合担任簇首,所在簇规模也越大。

(3)理想簇内的邻居节点数 Density:定义以节点 i 为中心, r 为半径内的相邻节点数为其理想簇内的邻居节点数。选择理想簇内的邻居节点数高的节点担任簇首,其邻居节点传输数据时消耗的总能量会相对较少。

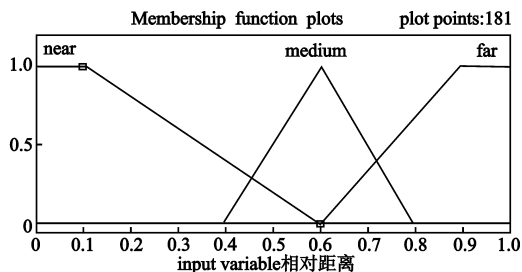
基于以上参数,制定成簇机制以构建簇。簇建立阶段主要由簇首选举、簇竞争半径的确定和节点成簇三个阶段组成。

4.3.1 簇首选举

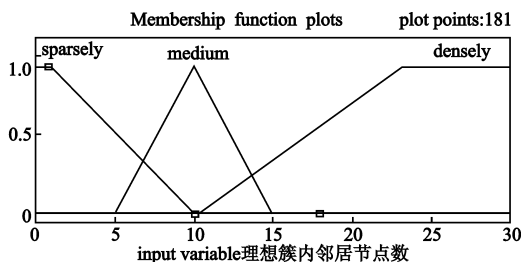
在簇首选择时,基于节点剩余能量、相对距离和理想簇内邻居节点数建立模糊系统 FIS1 确定节点成为簇首的概率 probability。根据网络实际情况设定 FIS1 的输入变量节点剩余能量、相对距离、理想簇内邻居节点数和输出变量节点成为簇首的概率的隶属函数如图 2、3 所示。



(a) 节点剩余能量隶属函数



(b) 相对距离隶属函数



(c) 理想簇内邻居节点数隶属函数

图 2 输入变量的隶属函数

根据上述输入、输出变量的隶属函数制定模糊

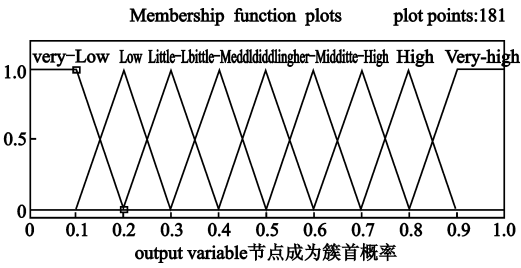


图 3 输出变量的隶属函数

逻辑系统 FIS1 的规则库见表 1.

表 1 FIS1 规则库

序号	剩余能量	相对距离	理想簇内邻居节点数	节点成为簇首的概率
1	Low	Far	Sparsely	Very Low
2	Low	Medium	Sparsely	Very Low
3	Low	Near	Sparsely	Low
4	Low	Far	Medium	Low
5	Low	Medium	Medium	Little Low
6	Low	Near	Medium	LittleLow
7	Low	Far	Densely	Little Low
8	Low	Medium	Densely	Little Middle
9	Low	Near	Densely	Little Middle
10	Medium	Far	Sparsely	Little Middle
11	Medium	Medium	Sparsely	Little Middle
12	Medium	Near	Sparsely	Middle
13	Medium	Far	Medium	Middle
14	Medium	Medium	Medium	Middle
15	Medium	Near	Medium	Middle
16	Medium	Far	Densely	Higher Middle
17	Medium	Medium	Densely	Higher Middle
18	Medium	Near	Densely	Higher Middle
19	High	Far	Sparsely	Higher Middle
20	High	Medium	Sparsely	LittleHigh
21	High	Near	Sparsely	LittleHigh
22	High	Far	Medium	LittleHigh
23	High	Medium	Medium	High
24	High	Near	Medium	High
25	High	Far	Densely	High
26	High	Medium	Densely	Very high
27	High	Near	Densely	Very high

每个节点依据上述模糊系统的输出进行解模糊化后确定 probability 并得到阈值函数 $T(n)$, 阈值 $T(n)$ 与节点生成的随机数比较, 若随机数小于阈值 $T(n)$, 则该节点当选簇首. $T(n)$ 的计算公式如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{\frac{K}{N}}{1 - \frac{K}{N} * (r \bmod \frac{N}{K})} * a + (1 - a) * \text{probability}, & n \in G \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (14)$$

公式(14)中 K 为经计算得出的最佳簇首数, N 为总节点数, a 为簇首数的影响因子.

4.3.2 簇竞争半径的确定

确定全部簇首后, 需确定每个簇的竞争半径 radius. 因在簇首选择时已优先选择了可能距簇中心

位置较近的节点, 暂时不需考虑理想簇内邻居节点数对竞争半径的影响. 故基于节点剩余能量和相对距离建立模糊逻辑系统 FIS2 推理各个簇的竞争半径 radius. 在 FIS2 中, 将剩余能量 Energy 和相对距离 Distance 划分为四个等级, 竞争半径 radius 划分为七个等级. 输入、输出变量的隶属函数和推理规则与 FIS1 相似, 在此不再赘述.

4.3.3 节点成簇

簇首及簇竞争半径确立完毕后, 各个簇首在竞争半径内向其他节点广播 Cluster_Msg 报文. 收到多个 Cluster_Msg 报文的普通节点根据报文中 probability 的大小选择簇首加入, 否则直接加入. 若有普通节点未收到 Cluster_Msg 报文, 则向其它节点广播申请加入簇首的请求, 选择最近的簇首节点加入.

4.4 数据传输

成簇完毕后, 簇首节点收集成员节点发送的数据. 之后, 簇首节点比较距同区域的中继节点和距基站的距离, 若簇首节点离基站更近, 则直接将数据传输给基站. 否则, 通过中继节点中转再发给基站.

5 仿真实验与结果分析

为了验证提出算法的有效性, 本文通过 Matlab 2012a 平台选取 LEACH 算法及文献[4]中提出的改进算法 Improved Algorithm1 和文献[5]中提出的改进算法 Improved Algor-ithm2 与本文提出的 NCFL 算法在总存活节点数、网络剩余能量和网络寿命等方面进行仿真对比并作出解释说明, 算法的相关参数配置如表 2 所示^[9].

表 2 仿真实验参数表

参数	数值
监测区域半径/m	100
基站位置/m	50,50
传感器节点数	200
$E_{de}/(\text{nJ/bit})$	50
$\epsilon_{fs}/(\text{pJ/bit/m}^2)$	10
$\epsilon_{mp}/(\text{pJ/bit/m}^4)$	0.001 3
$E_{DA}/(\text{nJ/bit})$	5
节点初始能量/J	0.5
控制包大小/bit	200
数据包大小/bit	4 000
簇首数影响因子	0.5

图 4 表示算法在相同条件下死亡和存活节点个

数随轮数变化而变化的情况. 从图中可以看出, 在 400 轮后所有算法均开始明显有节点死亡. LEACH 算法因为随机选取簇头, 且忽视簇规模的影响, 最先出现节点死亡现象. Improved Algorithm1 算法中成员节点选择簇首时选择较优的簇首, 但未合理选取簇首. Improved Algorithm2 算法筛选较优节点作为簇首, 但簇规模形成过程中仍有缺陷. NCFL 算法推举耗能小的节点作为簇首, 并对接收数据范围做出限制, 使整个网络能量消耗均衡, 减缓节点死亡速度.

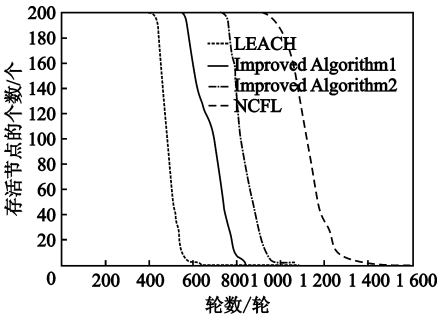


图 4 网络存活节点数随轮数变化

图 5 表示网络整体能量随轮数变化的情况. LEACH 算法随机选举簇首且未考虑簇规模大小, 故网络能量处于最低值. Improved Algorithm1 算法关注普通成员节点是否可合理选择簇首而选择随机选举簇首, 故在 700 轮左右时也趋于稳定. Improved Algorithm2 算法忽视簇规模对簇首能耗的影响, 但优先选择能量高的节点担任簇首, 对延长网络周期有一定的作用. NCFL 算法因为在选择簇头时选择较合适的节点, 避免能量低的节点因转发数据较多而提前死亡.

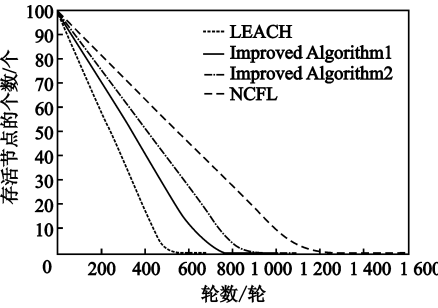


图 5 网络剩余能量随轮数变化

图 6 表示网络各个死亡节点轮数变化. 定义网络中第一个死亡节点的轮数为 FND, 十分之一的节点死亡的轮数为 TND, 全部节点死亡的轮数为 LND. NCFL 算法从簇首选取方法、簇半径和传输路径三方面进行改进后, 优先能量高、位置佳的节点

担任簇首, 并对簇大小进行限制. 从图中可以看出 NCFL 算法三个阶段的死亡时间均比其它算法晚, 可在一定时间内增加节点存活时长, 延长网络生命周期.

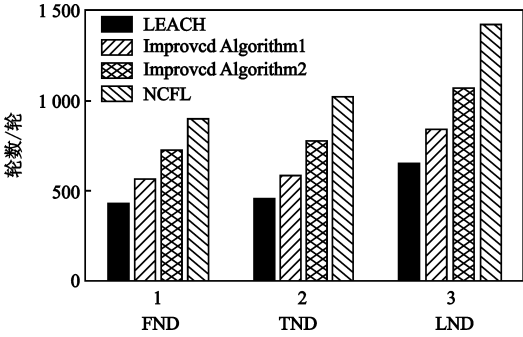


图 6 网络寿命随轮数变化

6 结束语

本文基于模糊逻辑提出一种非均匀分簇路由算法. 在簇首选举时综合考虑节点属性值优先选择耗能小的节点, 并对最佳簇首数目及簇规模做出计算, 最终将数据直接传给基站或通过较高能量的中继节点融合节点数据后传给基站. 实验结果表明, 本文提出的算法可以提高能量利用率, 均衡网络负载. 在未来的工作中, 将针对无线传感器网络的数据融合及中继节点的选择方法进行研究.

参考文献:

[1] 董玮,陈共龙,曹晨红,等. 面向软件定义架构的无线传感器网络[J]. 计算机学报, 2017, 40(8): 1779-1797.

[2] YADAV S , YADAV R S. A review on energy efficient protocols in wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2016, 22(1):335-350.

[3] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks[C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, IEEE, 2000: 3005-3014.

[4] BAGCI H , YAZICI A . An energy aware fuzzy approach to unequal clustering in wireless sensor networks[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(4): 1741-1749.

[5] MIRZAEI M, MAZINANI S M. MCFL: an energyefficient multi-clustering algorithm using fuzzylogic in wireless sensor network [J]. WIRELESS NETWORKS, 2018, 24(6): 2251-2266.

[6] ABIDI W, EZZEDINE T. Fuzzy Cluster Head Election Algorithm based on LEACH protocol for Wireless Sensor Networks[M]. International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, NEW YORK:IEEE, 2017: 993-997.

[7] MOSTAFAEI H. Energy-Efficient Algorithm for Reliable Routing of Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5567-5575.

[8] 胡中栋, 易涛, 王振东. 基于最优分簇的能量异构无线传感器网络路由协议[J]. 传感技术学报, 2018(8): 1240-1245.

[9] JOTHIKUMAR C, VENKATARAMAN R, RAJ T S, et al. An energy efficient cluster based routing approach to minimize energy consumption using CORP in wireless sensor networks[J]. Journal of Intelligent &

Fuzzy Sysytems, 2019, 36(6): 5835-5844.

[10] MEZGHANI M. An efficient multi-hops clustering and data routing for WSNs based on Khalimsky shortest paths [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(4SI): 1275-1288.

作者简介:

蒋 华 男,(1963-),博士,教授. 研究方向为数据库系统及信息安全.

王 瑶(通讯作者) 女,(1995-),硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络. E-mail: ts5748@126. com.

王慧娇 女,(1976-),硕士,副教授. 研究方向为无线传感器网络及信息安全.

王 鑫 男,(1976-),硕士,教授. 研究方向为无线传感器网络及云计算技术.

(上接第 24 页)

[4] LAMPERT C H, WIRJADI O. Anisotropic Gaussian Filtering using Fixed Point Arithmetic[C]// 2006 International Conference on Image Processing. Atlanta, Georgia, USA: IEEE, 2007:1565-1568.

[5] CORPORAAL H. Microprocessor Architectures - from VLIW to TTA[M]. Chichester :John Wiley & Sons, 1997:101-125.

[6] ESKO O, PEKKA J, HUERTA P, et al. Customized Exposed Datapath Soft-Core Design Flow with Compiler Support [C]// International Conference on Field Programmable Logic and Applications. Milano, Italy: IEEE Computer Society, 2010:217-222.

[7] RAMESH B, BHARDWAJ A, RICHARDSON J, et al. Optimization and evaluation of image- and signal-processing kernels on the TI C6678 multi-core DSP [C]// High Performance Extreme Computing Conference. Waltham, MA USA: IEEE, 2015:1-6.

作者简介:

杨莫洋 男,(1995-),硕士研究生. 研究方向为 SoC 设计与系统集成. E-mail: vanceyang@sjtu. edu. cn.

蒋剑飞 男,(1979-),助理研究员. 研究方向为高速数字集成电路设计、SoC 设计与系统集成.

王 琴 女,(1975-),副教授. 研究方向为大规模集成电路设计、先进集成电路设计方法.