

异构车联网中基于模糊层次分析的垂直切换算法

杨明极,王 娅,马 池,张 竹

(哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 异构车联网中车辆终端分布不均匀会导致切换失败率高及网络吞吐量下降,针对此问题,本文提出了一种基于模糊层次分析的垂直切换算法。首先对候选网络进行筛选,对网络筛选所依据的条件是切换时刻对于候选网络负载状态的预测,然后利用模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process,FAHP)确定各属性权重,并利用逼近理想解排序(technique for order preference by similarity to ideal solution,TOPSIS)算法进行判决,选取最优网络进行切换。仿真结果表明,在不同车辆终端数量的场景下,本文算法能够降低切换失败率,减少切换时延,提高系统的网络吞吐量。

关键词: 异构车联网;垂直切换;模糊层次分析法;逼近理想解排序;网络筛选

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)12-0085-05

Vertical Handoff algorithm Based on FAHP for Heterogeneous Internet of Vehicles

YANG Ming-ji WANG Ya, MA Chi, ZHANG Zhu

(School of Measure-control Technology and Communications Engineering,
Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to deal with the problem of heterogeneous distribution of vehicle terminals in heterogeneous IoV (Internet of Vehicles), which leads to the high switching failure rate and the decrease of network throughput, a vertical switching algorithm based on fuzzy analytic hierarchy process(FAHP) is proposed in this paper. Firstly, through predicting the switching time for the candidate network load state, the vertical switching algorithm to select adaptive network. And then use FAHP to determine the weight of each attribute. Finally, make use of technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) algorithm to decide the optimal target network. The simulation results show that the proposed algorithm can reduce the switching failure rate, reduce the switching delay and improve the network throughput of the system under different vehicle terminal scenarios.

Key words: Heterogeneous IoV; Vertical handoff; Fuzzy Analytic Hierarchy Process; Technique for Order Preference by Similarity to ideal Solution; network filtering

1 引言

未来车联网就是在多种无线网络相互融合的环境下,根据不同无线网络具有的特点,接入最合适的网络,为用户提供最佳的服务。不同无线网络在覆盖范围、传输速率、时延、带宽等方面有很大差别^[1],对终端会产生较大影响,过多的网络切换,也会使服务质量下降。因此,如何保证有效的切换是本文的研究

重点。

针对异构网络中的垂直切换研究,目前已有许多文献提出了很多切换算法^[2-9]。例如,文献[2]提出了一种卡尔曼滤波和模糊逻辑方法相结合的算法。在文献[5]中,马彬等提出了一种基于决策树的稳健垂直切换算法。文献[7]提出基于模糊逻辑的多终端协同的垂直切换算法。alhan 等提出了一种基于神经网络的垂直切换决策算法^[8]。尽管上述算法已取

得了较好的效果,但在切换前缺乏对网络的筛选,异构车联网中车辆终端数量以及分布对网络切换的影响也未加以研究。

针对上述问题,本文提出一种基于模糊层次分析的垂直切换算法。

2 基于模糊层次分析的垂直切换算法

2.1 预筛选模型

在模糊层次分析之前先进行预筛选处理,预测候选网络在切换时刻的负载状态,将切换时发生阻塞的概率大于设定门限值的网络从候选网络中删除。

假设有 L 个候选网络(其中包括 LTE 基站和 WLAN 接入点),单个呼叫所需的平均信道资源为 C_{aver} ,第 k 个候选网络的呼叫到达率和离开率分别服从参数为 λ^k 和 μ^k 的泊松分布。则网络 k 中在单位时间内增加 m^k 个呼叫的概率为

$$P(X = m^k) = \frac{(\lambda^k)^{m^k}}{m^k!} e^{-\lambda^k} \quad (1)$$

减少 n^k 个呼叫的概率为

$$P(X = n^k) = \frac{(\mu^k)^{n^k}}{n^k!} e^{-\mu^k} \quad (2)$$

网络 k 中单位时间内增加的负载为

$$\Delta C^k = (m^k - n^k) C_{\text{aver}} \quad (3)$$

则候选网络 k 在切换时刻的负载 L_h^k 可表示为

$$L_h^k = L_d^k + \Delta C^k = L_d^k + (m^k - n^k) C_{\text{aver}} \quad (4)$$

式中, L_d^k 为网络 k 在判决时刻的负载。

假设候选网络 k 的信道资源总数为 C_{max}^k ,则切换时刻的可用信道资源可表示为

$$C_h^k = C_{\text{max}}^k - L_h^k = C_{\text{max}}^k - L_d^k - (m^k - n^k) C_{\text{aver}} \quad (5)$$

对于每一个候选网络,当切换时刻负载过重,可用信道资源小于呼叫的接入需求时,切换请求将会被拒绝。假设切换时刻第 k 个候选网络中切换被阻塞的概率为

$$P_h^k = P(C_h^k < C_l) \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)可计算出切换时发生阻塞的概率,将阻塞概率大于门限值的网络从候选网络中删除。

2.2 属性权重分析

假设经过预筛选之后的网络总共有 $(m+n)$ 个候选网络,其中 LTE 网络有 m 个基站(Base Station,BS),WLAN 网络有 n 个接入点(Access Point,AP),为了叙述方便,本文用 BS^L 指代 LTE 网

络,用 BS^{WL} 指代 WLAN 网络,将所有候选 LTE 基站和 WLAN 接入点用集合 H 表示,则 $H = \{BS_1^L, BS_2^L, \dots, BS_m^L, BS_1^{WL}, BS_2^{WL}, \dots, BS_n^{WL}\}$,终端每次从集合 H 中选择一个基站进行连接。

2.2.1 判决属性

影响切换判决的因素有: SINR、切换时延、通信代价、可用带宽。

(1) 信号与干扰噪声

节点 i 从 LTE 基站 BS_j^L 接收的 SINR 值 $\gamma_{BS_j,i}^L$ 表示为^[10]:

$$\gamma_{BS_j,i}^L = \frac{G_{BS_j,i}^L P_{BS_j,i}^L}{P_0^L + \sum_{k=1, k \neq j}^m G_{BS_k,j}^L P_{BS_k,j}^L + G_{BS_j,i}^L \alpha (P_{BS_j}^L - P_{BS_j,i}^L)} \quad (7)$$

式中, $P_{BS_j}^L$ 是 LTE 基站 BS_j^L 的总发送功率; $P_{BS_j,i}^L$ 为基站 BS_j^L 对节点 i 的发送功率; $G_{BS_j,i}^L$ 为节点 i 与基站 BS_j^L 之间的信道增益; α 为正交因子,等于 0.4; P_0^L 为热噪声功率,等于 -99 dBm; 节点 i 从 WLAN 基站 BS_j^{WL} 接收到的 SINR 值 $\gamma_{BS_j,i}^{WL}$ 表示为:

$$\gamma_{BS_j,i}^{WL} = \frac{\sum_{k=1}^{s_i} G_{BS_j,i}^{WL} P_{BS_j,i}^{WL}}{P_B + \sum_{k=1, k \neq j}^n \sum_{s=1}^{n_s} G_{BS_k,j}^{WL} P_{BS_k,s}^{WL}} \quad (8)$$

式中, $P_{BS_j,k}^{WL}$ 为 WLAN 基站的发送功率; $G_{BS_j,i}^{WL}$ 为节点 i 与 WLAN 基站 BS_j^{WL} 之间的信道增益; s_i 为 WLAN 分配给节点 i 的子载波数, P_B 为背景噪声功率,值为 -86 dBm。

为了获得与从 WLAN 基站接收到的数据速率相等,可将 $\gamma_{BS_j,i}^{WL}$ 转化为节点从 LTE 基站接收到的等效 SINR 值 $\gamma_{BS_j,i}^L$:

$$\gamma_{BS_j,i}^L = \Gamma_{BS}^L \left[\left(1 + \frac{\gamma_{BS_j,i}^{WL}}{\Gamma_{BS}^{WL}} \right) \frac{W_{BS}^{WL}}{W_{BS}^L} - 1 \right] \quad (9)$$

式中, W_{BS}^L 与 W_{BS}^{WL} 分别代表 LTE 和 WLAN 网络的带宽; Γ_{BS}^L 与 Γ_{BS}^{WL} 分别代表 LTE 与 WLAN 网络中信道容量的增益与编码增益之差。

(2) 切换时延节点执行一次切换的时延为:

$$\tau_{dy HO} = 4(\tau_{mr} + \tau_{na} + \tau_{ai}) + \overline{\tau_H} + \overline{\tau_W} + \tau_{VHO_e} \quad (10)$$

式中, τ_{mr} 为节点与基站之间的时延; τ_{na} 为基站与 PDN 网关(P-GW)之间的时延; τ_{ai} 为 P-GW 与信息服务器(IS)之间的时延; $\overline{\tau_H}$ 和 $\overline{\tau_W}$ 为物理下行共享信道(PDSCH)和 WLAN 信道的平均时延; τ_{VHO_e} 为平均切换时延。

(3) 其他属性

令 S_i 为 $\gamma_{BS,i}^L$ 和 $\gamma_{j,i}^{WL}$ 组成的 SINR 向量; τ_i 为节点切换至各备选网络的切换时延向量; C_i 代表各个备选网络与节点 i 通信发送每个比特的归一化代价向量; U_i 表示各个备选网络的可用带宽. 根据以上 4 个判决属性, 属性矩阵 A_i 为:

$$A_i = [S_i \quad \tau_i^{-1} \quad C_i \quad U_i]^T \quad (11)$$

2.2.2 确定属性权重

本文确定属性权重采用三个步骤: 第一, 根据 FAHP 确定各属性的重要程度; 第二, 构建模糊判决矩阵; 第三, 得出网络属性对应的权重向量 ω .

首先在考虑判决准则、候选网络的基础上, 针对总目标构建层次结构模型. 在构建层次结构模型时, 本文假设上一层的元素 E 同下一层 ($L1$) 中的元素 $e_1, e_2, \dots, e_p$ 有联系, 则本文得出的模糊判决矩阵 P 如式(12)所示:

$$P = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, $0 \leq r_{ij} \leq 1, r_{ij} + r_{ji} = 1$. r_{ij} 是 e_i 比 e_j 重要的程度度量, 表示 e_i 和 e_j 相对于元素 E 进行比较时的模糊关系. 可以按照 $0.1 \sim 0.9$ 对 r_{ij} 进程赋值: $r_{ij} \geq 0.5$ 表示 e_i 比 e_j 重要; $r_{ij} < 0.5$ 表示 e_j 比 e_i 重要; $r_{ij} = 0.5$ 表示 e_i 和 e_j 有相同的重要度. 设 $e_1, e_2, \dots, e_p$ 的权重为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p$, 且满足:

$$\sum_{i=1}^p \omega_i = 1 \quad \omega_i > 0 \quad (13)$$

当元素 e_i 越重要, 其对应的权重值 ω_i 也越大.

若矩阵 P 满足一致性, 有式(14)成立^[9].

$$r_{ij} = 0.5 + \mu(\omega_i - \omega_j) \quad i, j = 1, 2, \dots, p \quad (14)$$

式中, μ 代表决策者对各个属性的重视程度, 联立式(14)和式(15), 可求得 $e_1, e_2, \dots, e_p$ 对应的权重 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p$, 即:

$$\omega_i = \frac{1}{p} + \frac{i}{\mu p} \left(\sum_{k=1}^p r_{ik} - 0.5p \right) \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (15)$$

同时若矩阵 P 满足一致性, 则有:

$$|\omega_i - \omega_j| = \frac{1}{|\mu|} \epsilon_{ij} \quad i, j = 1, 2, \dots, p \quad (16)$$

式中, ϵ_{ij} 为 P 中第 i 行与第 j 行对应元素之差, 由式(16)可知, $|\mu|$ 值的大小决定了 $|\omega_i - \omega_j|$ 的大小, 而 $|\omega_i - \omega_j|$ 反映了决策者对判决属性间的重要程度的重视. 权重值随着使 μ 值的不同而有所不同, 因

此, 可以根据决策者的要求, 选取合适的 μ 值, 得到合适的权重.

以 3GPP 定义的流媒体业务为例, 如使用 PDSCH 信道从 LTE 基站进行视频流传输, 因此在判决属性中可用带宽属性对判决结果具有重要的影响. 由判决结果的重要程度两两相互比较所得到的模糊判决矩阵 J 为:

$$J = \begin{matrix} & e_1 & e_2 & e_3 & e_4 \\ \begin{matrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.2 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.2 & 0.5 \\ 0.8 & 0.8 & 0.5 & 0.8 \\ 0.5 & 0.5 & 0.2 & 0.5 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (17)$$

式中, e_1, e_2, e_3, e_4 分别为 SINR、切换时延、通信代价、可用带宽. 利用文献[11]一致性判定定理可知矩阵 J 具有一致性. 在式(15)中, 令 $\mu = 0.4$, 可求出各个属性的权重值 $\omega_1 = 0.0625, \omega_2 = 0.0625, \omega_3 = 0.8125, \omega_4 = 0.0625$.

2.3 最佳目标网络的判决

TOPSIS 法所根据的基本核心思想是被选网络与理想解决方案、负理想解决方案之间的差距, 判决结果选择与理想解在几何空间上有最小 Euclid 距离的方案.

假设有 l ($l = m + n$) 个候选网络, z 个决策因素, 各候选方案与理想方案的 Euclid 距离如式(18)所示, 到负理想方案的 Euclid 距离如式(19)所示:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^l (v_{ij} - v_i^+)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, l) \quad (18)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^l (v_{ij} - v_i^-)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, l) \quad (19)$$

式中, $v_{ij} = \omega_i r_{ij}$; ω 为上节所确定的属性权重; r_{ij} 为决策因素; v_i^+ 为第 i 个评价因素的最优方案; v_i^- 为第 i 个评价因素的最劣方案.

与理想解决方案的相对接近程度用 C_i^+ 来衡量.

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^+ + C_i^-} \quad (0 < C_i^+ < 1, i = 1, 2, \dots, m) \quad (20)$$

根据式(20)算出每个候选网络的相对接近程度, 从其中选出相对接近程度最大的网络 k 即为最佳目标网络, 用 k_{TOPSIS}^* 表示为:

$$k_{\text{TOPSIS}}^* = \arg \max_{k \in [1, m]} C_k^+ \quad (21)$$

3 仿真结果及分析

3.1 仿真模型和仿真参数设置

本文仿真场景为 LTE, WLAN 所构成的异构

网,具体如图 1 所示,在仿真范围内,随机生成 600 个终端节点,这些节点的位置隔一段时间便会发生改变,其中它们的移动速度不超过 80 km/h. LTE 网络和 WLAN 网络的具体仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真系统参数		
参数	LTE 网络	WLAN 网络
发射功率 p (dbm)	44	30
覆盖半径 r (m)	1000	150
切换时延 t (ms)	48	120
接入带宽 w (Mbit/s)	2	27

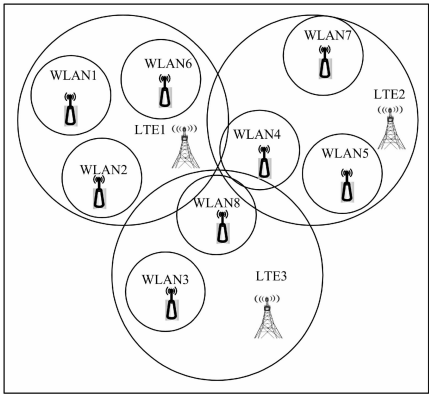


图 1 仿真场景

3.2 实验结果及分析

本文对本文算法与其他算法分别在切换失败率、切换时延和网络吞吐量三个方面进行了对比分析,本文所选取的对比算法分别为:TOPSIS 算法、文献[12]所提出的基于模糊层次分析的 PR-FA 算法和文献[13]所提出的基于贝叶斯决策的 BDT 算法.

3.2.1 切换失败率分析

图 2 为四种切换算法在不同的车辆终端数量下的切换失败率曲线,切换失败率指切换失败次数占总切换次数的比率的统计平均值,在一定程度上反映了一个算法的鲁棒性.由图 2 可以看出,随着车辆终端数量的增加,四种切换算法的切换失败率都会逐步上升,但上升的幅度是不一样的.四种切换算法切换失败率都会上升的原因是,当车辆终端数量不断增加,网络总体负载也随之增加,必然会造成切换失败率的增加.在四种切换算法中,TOPSIS 算法的切换失败率上升最快,在车辆终端数量达到 500 台时,其切换失败率已经达到了 0.13%,因为在 TOPSIS 算法中,没有考虑网络负载这样的切换因素,所以造成了较高的切换失败率. BDT 算法和 PR-FA 算法都将网络负载或网络阻塞率作为切换

所考虑的一个因素,但并没有作为主要的考虑因素,所以它们的切换失败率都比 TOPSIS 算法要略微下降,但并没有大幅度减少切换失败率,在车辆终端数量达到 500 台时,两种切换算法的切换失败率分别为 0.098%和 0.087%. 本文所提算法在切换判决进行之前,首先根据对候选网络负载的预测进行网络筛选,把网络负载超过限度的候选网络删除,保证了本文算法所选择的最佳网络的负载都在一定范围内,所以相对于其他算法而言,大幅度减少了切换失败率,在车辆终端数量达到 500 台时,本文算法的切换失败率仅为 0.035%.

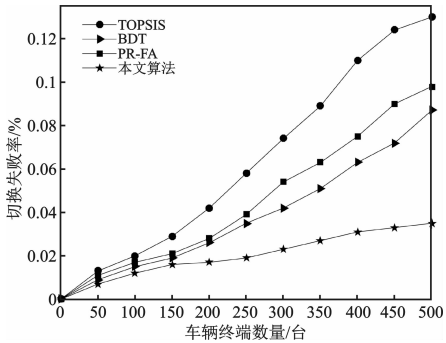


图 2 切换失败率曲线

3.2.2 切换时延分析

图 3 为四种切换算法在不同的车辆终端数量下的切换时延曲线.由图 3 中的曲线可以看出,随着车辆终端数量的增加,四种切换算法的切换时延都是随之增长的.在四种切换算法中,TOPSIS 算法的切换时延是最高的,当车辆终端数量在 50~300 台之间时,TOPSIS 算法的切换时延与 BDT 算法差别很小,但是随着车辆终端数量进一步增加,TOPSIS 算法的切换时延增长很快,这是由于 TOPSIS 算法虽然考虑了切换时延这一影响因素,但是没有考虑网络负载或网络阻塞率,导致切换失败率较高,当车辆终端增加到一定数量时,该算法的不足就暴露出来,使得切换时延增长很快. BDT 算法、PR-FA 算法与本文算法都考虑了切换时延和网络负载,所以随着车辆终端数量的增加,切换时延的增长都很平稳,由于本文算法在模糊判决之前,根据网络负载对候选网络进行了筛选,剔除了网络负载较高的网络,所以相比较于 BDT 算法和 PR-FA 算法,本文算法的切换时延更低,增长速率也更低.

3.2.3 网络吞吐量分析

图 4 为四种切换算法在不同的车辆终端数量下的网络总吞吐量曲线.由图 4 中的曲线变化图可以看出,当车辆终端数量在 0~300 之间变化时,四种

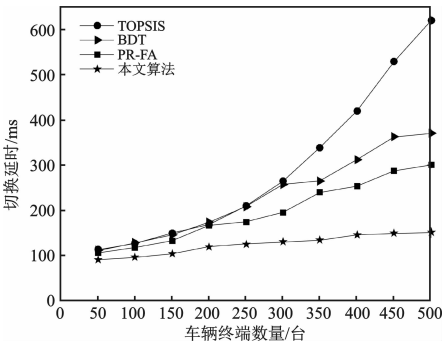


图 3 切换时延曲线

切换算法的网络总吞吐量都随着车辆终端数量的增加而增长。当车辆终端数量超过 300 时,TOPSIS 算法随着车辆终端数量的增加总体呈下降趋势,这是因为 TOPSIS 算法的带负载能力总体较弱,当车辆终端数量达到 300 时已经到该算法所能容纳车辆终端数量的极限,超过这个极限,会使整个网络性能变差。BDT 算法和 PR-FA 算法的网络总吞吐量总体性能表现没有很大差别,当车辆终端数量在 0~200 之间时,BDT 算法、PR-FA 算法和本文算法的网络总吞吐量差别也不明显,当车辆终端数量超过 200 时,本文算法的网络总吞吐量比另外两种算法有很大提升,说明本文算法的带负载能力最强。因为本文算法较多地考虑了网络负载,使网络负载在各网络间得到均衡,所以当车辆终端数量大量增加时,本文算法的优势就能够体现。在车联网中,经常有车辆终端数量巨大,且终端数量在不同的地方差别较大的情况,本文算法无论是在车辆终端数量较少还是车辆终端数量较多的情况下都能有很好的性能。

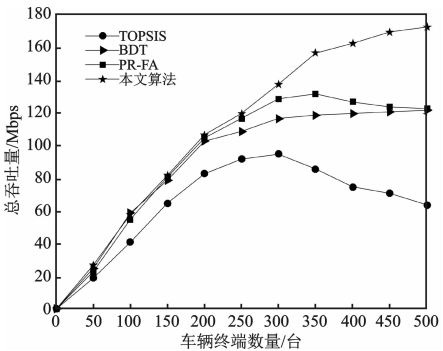


图 4 网络吞吐量曲线

4 结束语

针对车辆终端分布不均匀的异构车联网中的垂直切换问题,本文提出了一种基于模糊层次分析的垂直切换算法。本文所提算法首先对候选网络进行

筛选,对网络筛选所依据的条件是切换时刻对于候选网络负载状态的预测,以获得网络负载在一定限度的候选网络,然后利用 FAHP 确定各属性权重,本文将干扰噪声比(SINR)、切换时延、可用带宽、通信代价作为影响判决的因素,并利用 TOPSIS 算法进行判决,最终选取最优网络进行切换。仿真结果表明,与现有的 TOPSIS 算法、BDT 算法和 PR-FA 算法相比,本文所提算法能大幅度降低切换失败率,减少切换时延,提高整个系统的网络吞吐量,同时也证实了异构车联网中车辆终端数量分布对网络性能有很大影响。下一步的工作,将根据异构车联网中用户偏好的网络需求对算法进行优化,以使所提算法更加贴近异构车联网具体应用。

参考文献:

[1] 李永刚, 张治中, 李龙江. 一种 WLAN 与 eHRPD 系统间负载均衡算法[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34 (1) : 44-47.

[2] Kustiawan I , Chi K. Handoff decision using a kalman filter and fuzzy logic in heterogeneous wireless networks [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19 (12) : 2258-2261.

[3] Kaleem F, Mehbodniya A, Islam A, et al. Dynamic target wireless network selection technique using fuzzy linguistic variables [J]. China Communications, 2013, 10(1) : 1-16.

[4] Bhosale S, Daruwala R. Multi-criteria vertical hand off decision algorithm using hierarchy modeling and Additive weighting in an Integrated WLAN/WiMAX/UMTS environment - a case study[J]. Ksii Transactions on Internet & Information Systems, 2014, 8(1) : 35-57.

[5] 马彬, 汪栋, 谢显中. 车辆异构网络中基于决策树的稳健垂直切换算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(7) : 1719-1726.

[6] Singhrova A, Prakash N. Vertical handoff decision algorithm for improved quality of service in heterogeneous wireless networks[J]. Iet Communications, 2012, 6 (2) : 211-223.

[7] 任焱晔, 赵季红, 曲桦. 基于模糊逻辑的多终端协同的垂直切换决策算法[J]. 通信学报, 2014, 35(9) : 67-78.

[8] Çalhan A, Çeken C. Artificial Neural Network Based Vertical Handoff Algorithm for Reducing Handoff Latency[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 71(4) : 2399-2415.

同构多核系统上映射较大点数 FFT 的有效方法. 如 32 K,64 K 甚至更大点数的 FFT 均可按照本文的方法分成若干个较短的 FFT,再结合本文所述映射方法实现. 另外,IFFT 也具有相似的数学表达式,同样可以被映射到相同的结构中而不需要更多的硬件消耗.

参考文献:

[1] Liang C, Huang X. Mapping Parallel FFT Algorithm onto SmartCell Coarse-Grained Reconfigurable Architecture[C]// IEEE International Conference on Application-Specific Systems. Architectures and Processors. IEEE,2009, 231-234.

[2] Ingemarsson C, Källström P, Qureshi F, et al. Efficient FPGA Mapping of Pipeline SDF FFT Cores[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2017(99):1-12.

[3] Friedrich J, Le H, Starke W, et al. The POWER8 TM, processor: Designed for big data, analytics, and cloud environments[C]// IEEE International Conference on Ic Design & Technology. IEEE, 2014;1-4.

[4] 李大鹏,张盛兵,罗旻. 32 位 RISC 微处理器“龙腾 R2”浮点流水线的设计和实现[J]. 微电子学与计算机, 2006,23(01):188-191.

[5] Andor Krizsan, Dr. Daniela Volke, Stefanie Weinert, et al. Generator of dynamically reconfigurable processor[J]. Artificial Life and Robotics, 2015, 20(2):

103-108.

[6] Ilija M. Milićic, Djordje Ladjinovic. Computer simulation of two frequency response excitation 1D dynamic model using FFT and IFFT algorithm[C]// International Conference - Contemporary Achievements in Civil Engineering. 2016.

[7] Qureshi I A, Qureshi F. Generalized twiddle factor index mapping of radix-2 fast Fourier transform algorithm[C]// IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science. IEEE, 2014.

[8] Schmittfull M, Vlah Z. FFT-PT: Reducing the 2-loop large-scale structure power spectrum to one-dimensional, radial integrals[J]. Physical Review D, 2016, 94(10).

作者简介:

曲冬明 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为集成电路设计与测试. E-mail:765488048@qq. com.

王晓蕾 女,(1978-),硕士,副研究员. 研究方向为集成电路设计理论研究

宋宇鲲 男,(1975-),博士,副研究员. 研究方向为面向数据高密度和计算密集应用的 SoC/MPSO 体系结构与实现.

张多利 男,(1976-),博士,硕士生导师. 研究方向为多核处理器体系结构与设计方法,多媒体专用集成电路设计实现等.

杜高明 男,(1977-),博士,硕士生导师. 研究方向为片上网络体系结构性能分析.

(上接第 89 页)

[9] 郭强,张晓萌,朱若函. 基于粒子群优化的模糊神经网络垂直切换算法[J]. 微电子学与计算机, 2015,32(8) : 12-18.

[10] 3GPP TR 25. 942, Radio frequency (RF) system scenarios (Release 10) [S].

[11] 张吉军. 模糊层次分析法[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2) : 80-88.

[12] 陶洋, 刘小虎, 陶玲. 基于 QoS 的异构网络垂直切换算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(12) : 91-96.

[13] 孔令斌, 王军选, 孙长印. 多网络共存下基于贝叶斯

的垂直切换算法[J]. 电讯技术, 2016, 56(2) : 122-127.

作者简介:

杨明极 男,(1971-),博士,教授. 研究方向为移动通信系统.

王 娅(通讯作者) 女,(1993-),硕士研究生. 研究方向为无线通信技术. E-mail:wyaya7766@163. com;

马 池 女,(1992-),硕士研究生. 研究方向为无线通信技术.