

基于云自适应粒子群算法的 NoC 路径分配研究

许川佩, 侯红菊

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 在云自适应粒子群算法基础上提出一种新的云自适应更新函数并将其应用在 2D Mesh 拓扑的片上网络中, 来优化静态通讯分配结果. 该更新函数的参数随着粒子适应度值和拓扑规模的不同而变化, 并注重全局搜索和局部收敛的结合作用, 使两者达到最佳结合点, 避免了单一的全局搜索和局部收敛的弊端. 实验证明, 这种方法在拓扑规模越大时, 效果越明显, 与改进的粒子群算法相比较结果优达 25.74%.

关键词: 片上网络; 路径分配; 云自适应更新函数

中图分类号: TN47

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)09-0013-04

Research of NoC Path Allocation Based on Adaptive PSO Based on Cloud Theory

XU ChuNoCan-pei, HOU Hong-ju

(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic, Gluilin 541004, China)

Abstract: In this paper, based on adaptive Particle Swarm Optimization (PSO) based on cloud theory, a new adaptive update function based on cloud theory is proposed and applied in the 2D-Mesh topology to optimize distribution of static communication. The parameters of the function varies with the fitness value of particle and the size of topology. The function focus on global and local convergence of binding, so that which achieve the best combination of point to avoid disadvantages of single global search and single local convergence. Experiments show that the effect is more obvious when the size of topology is larger and excellent results is up to 25.74% when comapared with PSO.

Key words: NoC; path allocation; adaptive update function based cloud

1 引言

NoC 的路径分配是根据具体通信应用, 选定网络拓扑结构, 寻找一系列传输信息的有效路径集的过程. 映射算法中调用的路径分配算法大部分采用 XY 路由^[1], 这种方法最易实现, 但是没有考虑网络的实际通讯状况, 容易造成热点附近网络拥塞. 文献[2]为了平衡通信流采用了多条路径, 但数据包乱序到达目的节点, 还需要复杂的包排序操作. 文献[3]则以带宽作为平衡网络通信的参数, 并采用了粒子群算法搜寻最佳路径, 但是易于陷入局部最优, 出现早熟收敛的问题.

文中基于二维网格的 NoC 平台, 以每个通信任务的通信量为参数, 以优化链路负载方差为目标, 为每条通讯踪迹选择最短路径, 减少通讯延时, 避免通信拥塞. 对文献[3]改进, 采用云自适应粒子群算法, 提出了一种新的云自适应更新函数. 全局搜索和局部搜索结合, 先全局搜索, 使搜索空间快速收敛于某一区域, 然后局部精细搜索获得高精度解, 可在相同条件下达到更好的路径分配结果.

2 NoC 平台

2.1 NoC 平台结构

由于二维网格 (2D-Mesh) 具有结构简单, 带

收稿日期: 2010-12-21; 修回日期: 2011-02-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60766001)

宽,可扩展性好,便于实现和分析等优点,在 NoC 领域得到了广泛的应用.图 1 为 4×4 规模的 2D-Mesh 构成的 NoC 平台.

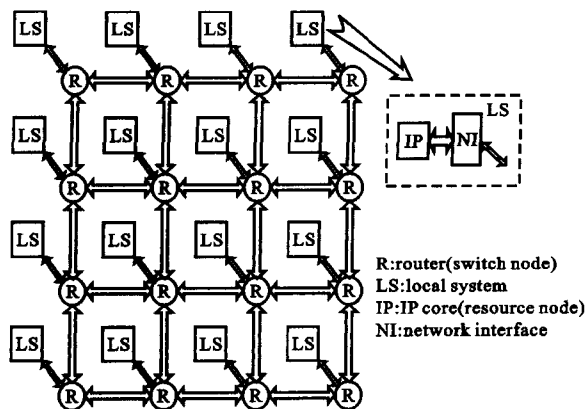


图 1 2D-Mesh 平台结构

图 1 所示 NoC 平台,由路由器(R),链路和本地子系统(LS)组成.路由器是组成网络的核心部件,构成开关(Switch)节点.本地子系统包含 IP 核和网络接口(NI),构成资源(Resource)节点.

2.2 路径分配问题描述

路径分配就是根据 NoC 网络的具体通讯状况,在某种限定条件下,为任意两个资源节点间的通信分配一条满足特定条件的最小化路径^[4].路径的选择极大影响着 NoC 通信结果的链路负载平衡,以及其他性能参数,如带宽、延迟、延迟的抖动以及资源使用率等.链路负载的不平衡很容易导致 NoC^[5]的某些通信链路进入拥塞模式,降低 NoC 系统的性能.而减小报文延迟最有效的途径就是缓解网络拥塞,而缓解拥塞的关键在于平衡链路负载^[6].文中通过合适的路径分配最大程度上以链路负载平衡为目标保证 NoC 系统不进入拥塞模式,从而达到减小通讯延迟的目的.

为了用公式说明所要解决的问题,给出如下定义:

定义 1 NoC 拓扑结构图.描述 NoC 结构和核心之间互连关系的有向图称为 NoC 拓扑结构图,记作 $A(T, R)$,其中 $\forall t_i \in T$,表示 NoC 中的一个核心,有向边 $r_{i,j}$ 表示从 t_i 到 t_j 的通信.对于每一条 $r_{i,j}$, $\forall p_{i,j} \in p_{i,j}$ 表示从 t_i 到 t_j 的通信路径,它由若干核心之间的链接 l_k 组成; $b_{w_{i,j}}$ 表示从 t_i 到 t_j 所能提供的网络带宽; $w_{i,j}$ 表示 t_i 到 t_j 的通信量,以数据包为单位计通信量.

定义 2 核图.描述处理单元之间通信关系的有向图称为核图,记作 $G(V, E)$.其中, $\forall v_i \in V$ 表

示一个资源节点, $\forall e_{i,j} \in E$ 表示从 v_i 到 v_j 的通信踪迹. $e_{i,j}$ 的属性 $d(e_{i,j})$ 表示从 v_i 到 v_j 的延迟约束(hops),属性 $b(e_{i,j})$ 表示带宽需求(Mbps),属性 $l(e_{i,j})$ 表示链路负载,以数据量为参数.

定义 3 路径分配.确定 $A(T, R)$ 中 2 个 tile 间通信路径的过程称为路径分配,表示为路由方程: Routing: $R \rightarrow P$.其中, R 表示 $A(T, R)$ 中所有 $r_{i,j}$ 的集合, P 表示所有路由路径的集合.则目标为找到一组确定的最短路径 $p_{i,j} \in P_{i,j}$,使网络的链路负载方差最小,达到最大的链路负载平衡状态.

目标函数:

$$\min U(L) = \sum_{i=1}^N [\text{load}(l_k) - \text{load}(l_{\text{avg}})]^2 / N \quad (1)$$

其中:

$$\text{load}(l_k) = \sum_{\forall e_{i,j} \in E} w(e_{i,j}) * f(l_k) \quad (2)$$

$$\text{load}_{\text{avg}} = \sum_{i=1}^N \text{load}(l_k) / N \quad (3)$$

$$f(l_k) = \begin{cases} 1 & l_k \in P_{i,j} \\ 0 & l_k \notin P_{i,j} \end{cases} \quad (4)$$

其中, l_k 为网络中第 i 条链路, $\text{load}(l_k)$ 为链路 l_k 的负载量, N 为链路总数, $\text{load}(l_{\text{avg}})$ 为整个网络的平均链路负载量.方差表征一个分布的离散程度,方差越大分布越不均匀,因此通信延时的优化目标转化为最小链路负载方差.

3 基于云自适应粒子群算法的路径分配

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO^[7])是一种基于群体智能的优化算法,需要调整的参数较少,易于实现,收敛快.而 NoC 的路径分配是个 NP 问题,并且要求能够快速搜寻到最优解,所以将粒子群算法用到 NoC 的路径分配问题上非常有意义.

然而 PSO 算法也存在易于陷入局部最优,出现早熟收敛的缺点.云模型^[6]云滴具有随机性和稳定倾向性等特点,而正态云模型是云方法中应用最具普适性的模型.

为了解决 PSO 算法这个缺点,文献[6]提出一种云自适应粒子群算法(Adaptive Particle Swarm Optimization Algorithm based on Cloud Theory, CAPSO^[6])引入正态云模型,根据粒子适应度值把种群分为三个子群,分别采用不同的惯性权重生成策略^[7],由 X 条件云发生器^[8]自适应调整普通子群

粒子的惯性权重,使惯性权重既具有传统的趋势性,满足快速寻优能力,又具有随机性,在提高收敛速度和保持种群多样性之间做了一个很好的权衡。

3.1 云自适应粒子群算法

3.1.1 基本粒子群算法描述

设在一个 S 维的目标空间中,有 m 个粒子组成一个群体,其中第 i 个粒子表示为一个 S 维的向量 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{is})$, $i = 1, 2, \dots, m$. 每个粒子的位置都是一个潜在的解,将 x_i 代入目标函数可以得出其适应值. 第 i 个粒子飞翔的速度为 S 维向量, $V = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{is})$ 把第 i 个粒子迄今为止的最优位置 pbest 记为 $P_{is} = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{is})$, 把整个粒子群迄今为止的最优位置 gbest 记为 $P_{gs} = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gs})$. 粒子按如下公式更新自己的位置

$$v_{is}(t+1) = \omega v_{is}(t) + c_1 r_{1s}(t)(p_{is}(t) - x_{is}(t)) + c_2 r_{2s}(t)(p_{gs}(t) - x_{is}(t)) \quad (5)$$

$$x_{is}(t+1) = x_{is}(t) + v_{is}(t+1) \quad (6)$$

其中, $i \in [1, m]$, $s \in [1, S]$, $t \in [1, T]$, T 为最大迭代次数.

3.1.2 云自适应调整策略

设粒子群的大小为 M , 目标函数为 $f(X)$, 第 t 次迭代中粒子的适应度值为 f_i ; 粒子群的平均适应值为 $\bar{f} = \frac{1}{M} \sum f_i$, $i \in [1, M]$; 将适应度值优于 $\bar{f}$ 的适应值求平均得到 $\bar{f}'$, 适应度值次于 $\bar{f}$ 的适应值求平均得到 $\bar{f}''$, 最优粒子的适应值为 $f_{\min}$.

将粒子群体分成三个子群, 分别采用不同惯性权重 ω 生成策略, ω 的生成规则是:

① f_i 优于 $\bar{f}'$

适应度值小于 $\bar{f}'$ 的粒子, 是群体中较为优秀的粒子, 已经比较接近全局最优, 所以采用较小的惯性权重, 加快其全局收敛的速度. ω 取值为 0.2.

② f_i 优于 $\bar{f}''$ 但次于 $\bar{f}'$

这是群体中一般的粒子, 按 X 条件云发生器非线性动态的调整粒子 X_i 的惯性权重. 自适应粒子群惯性权重生成新算法:

$$E = \bar{f}' \quad (7)$$

$$S = (\bar{f}' - f_{\min})/c_1 \quad (8)$$

$$H = S/c_2 \quad (9)$$

$$S' = \text{normrnd}(S, H) \quad (10)$$

$$\omega = 0.9 - 0.5 * \frac{-f(f_i - \bar{f}')^2}{2(S')^2} \quad (11)$$

随着粒子适应度值的减小, 由数学极限定理易知, $0 < \exp \frac{-f(f_i - \bar{f}')^2}{2(S')^2} < 1$, 保证了 $\omega \in [0.4, 0.9]$.

9], 从 ω 的取值公式可知 ω 会随着粒子的适应度值的减小而减小, 从而实现了较优粒子取得较小的 ω 值.

③ f_i 次于 $\bar{f}''$

适应度值大于 $\bar{f}''$ 的粒子为群体中较差的粒子, ω 取 0.9.

3.1.3 云自适应更新函数

CAPSO 的基本算法最初是用来对连续函数进行优化的, 而路径分配是离散问题, 所以必须把连续区间变成只能取 1 或 0 的整数区间, 故对算法引入新的更新规则, 以适合路径分配模型的建立.

CAPSO 算法为了改进 PSO 算法易陷入局部最优的缺点, 根据粒子适应度值自动调整惯性权重 ω 的值, 进一步开拓搜索空间, 加强了粒子的全局搜索作用. 在小拓扑规模下, 解个数比较少的情况下, 两种算法相差不大. 但是在大规模时, CAPSO 算法由于比较单一的针对 PSO 易陷入局部最优, 改善了全局搜索, 容易因为全局作用过强搜不到最优解, 结果可能反而没 PSO 算法优越. 文中引入云自适应更新函数, 通过设置合适的参数, 让全局搜索和局部收敛结合起来以搜索到最优解.

采用简单的二进制编码, 引入下式代替 (6) 式更新粒子位置

$$x_{is}(t+1) = \begin{cases} 1, & T(v_{is}(t+1)) > R(t+1) \\ 0, & T(v_{is}(t+1)) < R(t+1) \end{cases} \quad (12)$$

$R(t+1)$ 是由随机函数发生器产生的伪随机数, 介于 $[0, 1]$.

云自适应更新函数:

$$T(v_{is}(t+1)) = 0.5 * (1 + \tan(v_{is}(t+1)/A)) \quad (13)$$

函数 $T(v_{is}(t+1))$ 的曲线如图 2 所示.

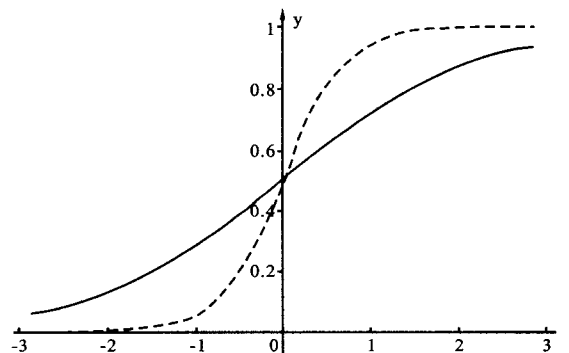


图2 云自适应更新函数的曲线图

可以看出,函数的阈值为 $[0, 1]$. 实线和虚线分别代表 A 取值不同的情况, A 取值越大, 曲线越平滑, 饱和点大, 粒子飞翔最大速度值越大, 可以更大程度的探索搜索空间, 利于全局寻优; 而 A 取值越小, 曲线的饱和点越小, 粒子飞翔最大速度值越小, 利于局部精细寻优获得高精度解。

所以结合粒子适应度值的不同, 当粒子为最优粒子时, A 取值较小, 使局部收敛的更快; 当粒子为最差粒子时, A 取值较大, 可以更进一步开拓搜索空间; 当粒子为一般粒子时, A 的取值介于两者之间, 且 A 的取值随着拓扑结构的不同也跟着变化. 这样就把全局搜索和局部搜索结合起来, 能够使两者各自的搜索作用充分发挥, 而避免了单一的全局搜索和局部早熟的弊端. 实验结果表明这种方法切实有效。

3.2 基于 CAPSO 算法的路径分配算法

以坐标形式表示源节点和目标节点, 采用简单的二进制编码, 1 表示 X 方向, 0 表示 Y 方向, 根据两坐标差值的和决定粒子编码序列的位数并判断数据的基本流向, 剔除掉不处于最短距离路径上的节点和所有与传输方向相反的通道. 对通信任务进行划分, 将固定路径的通信任务划分出来, 提高计算效率。

具体步骤如下:

(1) 初始化粒子群, 生成各粒子的初始位置、初始速度、个体极值 pbest 和全局极值 gbest.

(2) 根据式(1)计算每个粒子的适应度值. 将粒子的适应度值 f_i 与 pbest 的适应度值相比较, 如果 f_i 更优, 则 pbest 更新为 f_i 的当前位置; 将此时为自身 pbest 的 f_i 再与 gbest 相比较, 如果 f_i 更优, 则 gbest 更新为 f_i 的当前位置。

(3) 根据 CAPSO 算法原理, 判断粒子适应度值, 将粒子分为三个种群, 其中普通的的粒子由 X 条件云发生器自适应调整的调整惯性权重 w . 按照改进的算法式(5)和(12)更新粒子的速度和位置。

(4) 判断算法的终止条件是否达到, 若满足输出 gbest 的相关信息, 否则返回(2)。

4 结果验证

为了验证文中的理论的正确性和算法结果的优越性, 采用英国南安普顿大学开发 Nirgam 仿真器进行仿真。

选取任务图 G1 为例, 采用 3×3 的 Mesh 结构, 虫孔交换机制, 固定的包数据注入率, 仿真频率为

1GHz. 仿真环境中数据的最小单元是 Flit, 每个数据包由 3 个 Flit 组成, 每个 Flit 之间的时间间隔为 2ns. 路由算法为源路由算法, 在 Nirgam 仿真器源路由仿真模式下, 分别选取 CAPSO 算法和 PSO 算法的一组结果进行仿真, 得出的网络平均延时和吞吐量如表 1 所示。

表 1 两种算法得出的通讯延时和吞吐量的比较

算法	包平均延时 (Cycles)	平均吞吐量 (Gbps)
CAPSO 算法	17.251	13.0526
PSO 算法	21.2589	11.5066

由表 1 得知, CAPSO 算法得到的路径比 PSO 算法得到的路径的网络通讯延时更小, 网络吞吐量更大, 这说明采取以平衡链路负载的方式减小网络通讯延时是有效的, CAPSO 算法比 PSO 算法更具优越性^[9-10]。

5 结束语

文中选择云自适应粒子群算法对 NoC^[11] 静态通讯路径分配展开研究, 并提出一种新的自适应更新函数, 搜索最佳路径. 仿真实验证明, 文中的方案可以减小通讯延时, 提高系统的吞吐量. 尤其是拓扑结构规模较大, 任务图越复杂时, 优势体现的越明显。

参考文献:

- [1] Hu J, Marculescu R. Energy-aware mapping for tile-based NoC architectures under performance constraints [C]//Design Automation Conference. ASP-DAC, Japan. ACM, 2003: 233-239.
- [2] Murali S, Micheli G D. Bandwidth-constrained mapping of cores onto NoC architectures [C]//Proc DATE. Paris France: IEEE Computer Society, 2004(2): 896-901.
- [3] Xu Chuanpei, Yan Xiaofeng, Chen Yuqian. A technique for NoC routing based on hybrid particle swarm optimization algorithm [C]//Genetic and Evolutionary Computing, 2009. WEGC'09. 3rd International Conference. China: Guilin, 2009(8): 607-610.
- [4] 岳培培, 刘建, Sheraz Anjum, 等. 基于遗传算法的 NoC 路径分配算法 [J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(4): 68-71.
- [5] 杨盛光, 李丽, 高明伦, 等. 面向能耗和延时的 NoC 映射方法 [J]. 电子学报, 2008, 36(5): 937-942.

(下转第 21 页)

5 结束语

文中采用 $0.18\mu\text{m}$ CMOS工艺设计了一个应用于超宽带脉冲无线电通信系统的数控环形振荡器。提出了一种新型延时单元,应用于多环路结构的环形振荡器,并采用3级调谐的方法,实现了 $3\sim 8.6\text{GHz}$ 宽调谐范围和 2MHz 调谐精度,平均功耗为 20mW ,各项指标满足IR-UWB系统对数控振荡器的要求。

参考文献:

- [1] Siwiak K, McKeown D. Ultra-wideband radio technology[M]. New York: Wiley, 2004.
- [2] 伍翠萍,何波,于奇,等.一种低电压低功耗的环形压控振荡器设计[J].微电子学与计算机,2008,25(5):69-72.
- [3] Tierno J A, Rylyakov A V, Friedman D J. A wide power supply range, wide tuning range, all static CMOS all digital PLL, in 65 nm SOI [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, 43(1): 42-51.
- [4] Fahs B, Ali-Ahmad W Y. A two stage ring oscillator in $0.13\mu\text{m}$ CMOS for UWB impulse radio[J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(5): 1074-1082.
- [5] Ryckaert. A $0.65\text{-to-}1.4\text{ nJ/Burst }3\text{-to-}10\text{ GHz}$

UWB all-digital TX in 90nm CMOS for IEEE 802.15.4a [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2007, 42(12): 2860-2869.

- [6] Yuanjin Zheng, Annamalai Arasu M. A $0.18\mu\text{m}$ CMOS 802.15.4a UWB transceiver for communication and localization[C] // IEEE Solid-State Circuit Conference. Japan: Fukuoka, 2008: 118-600.
- [7] Eken Y A, Uyemura J P. A 5.9GHz voltage-controlled ring oscillator in $0.18\mu\text{m}$ CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004, 39(1): 230-233.
- [8] Lizhong Sun, Kwasniewski T A. A $1.25\text{-GHz }0.35\mu\text{m}$ monolithic CMOS PLL based on a multiphase ring oscillator[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2001, 36(6): 910-916.
- [9] 魏伟伟,于海勋,李卫民,等.一种宽带低相噪 CMOS LC 压控振荡器设计[J].微电子学与计算机,2010,27(9): 65-68.

作者简介:

邓春男,(1987-),硕士研究生.研究方向为超大规模集成电路设计.

龚敏男,(1961-),教授,博士生导师.研究方向为宽禁带半导体材料、器件物理及工艺、集成电路设计.

邬齐荣男,(1949-),副教授.研究方向为超大规模集成电路设计和应用.

(上接第16页)

- [6] 韦杏琼,周永权,黄华娟,等.云自适应粒子群算法[J].计算机工程与应用,2009,45(1):48-50.
- [7] Eberhart R, Kenedy J. A new optimizer using particles swarm theory[C] // Proc Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya, Japan: IEEE Service center, Piscataway, 1995: 39-43.
- [8] Zhu Yufang, Dai Chaohua, Chen Weirong, et al. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithm based on cloud generators[J]. Journal of Computational Information Systems, 2005, 1(4): 671-678.
- [9] Dick R Rhodes P, Wolf D L W. Tgff: task graphs for free [C] // Proceedings of the 6th International Workshop on Hardware / Software Codesign. Seattle, 1998:

97-101.

- [10] Srinivasan K, Chatha K S. A technique for low energy mapping and routing in network-on-chip architectures [C] // Proc of 2005 International Symposium on Low Power Electronics and Design. San Diego, 2005: 387-392.
- [11] 魏建军,康继昌,雷艳静. NoC 的平衡设计[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(5): 54-57.

作者简介:

许川佩女,(1968-),博士,教授,硕士生导师.研究方向为集成电路测试及嵌入式系统应用.

侯红菊女,(1987-) 硕士研究生.研究方向为集成电路测试.