

基于蚁群优化算法的多 QoS 选播路由算法研究

李陶深, 肖 猛, 葛志辉, 赵志刚
(广西大学 计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004)

摘 要: 提出一种基于蚁群优化算法的多 QoS 选播路由算法. 算法设计了合理的路径评价方法, 从平衡网络负载的角度出发, 寻找适当的选播路由路径. 通过对迭代最优解路径上的信息素的调整 and 算法重启的策略, 算法有效地避免了陷入局部最优的缺陷, 扩大了算法的搜索范围. 实验结果表明, 该算法能找到满足 QoS 约束的全局最优解, 并在资源预留的基础上较好地满足用户对于带宽、时延的要求.

关键词: 蚁群算法; 选播路由; QoS 约束; 负载均衡

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)08-0091-05

Research on Multiple QoS Anycast Routing Algorithm Based on Ant Colony Algorithm

LI Tao-shen, XIAO Meng, GE Zhi-hui, ZHAO Zhi-gang

(School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: A new QoS anycast routing algorithm based on an ant colony algorithm is proposed in this paper. In order to search a reasonable anycast routing path, a felicitous estimate method of the optimization path is designed and the load balance is considered. By adjusting the pheromone in the iteration-best path and re-initializing the algorithm, the proposed algorithm can efficiently avoid falling into local optimal and it can enlarge global searching. The results of the simulating experiment show that the algorithm can effectively find the global-best solution that satisfied the QoS constraint and balance the load of networks, and also can be utilized to satisfy the need of the clients for bandwidth, delay and cost on the basis of resource reservation.

Key words: Ant Colony Algorithm; anycast routing; Service of Quality(QoS) constraint; load balance

1 引言

选播(Anycast)是 Partridge 等于 1993 年首次提出,并在 IPv6 中被规定为一种标准的通信服务模型^[1].选播的实现很大程度上取决于对路由的选择.研究表明^[2],基于多个不相关可加度量的 QoS 路由问题是一个 NP 完全问题,目前采用的方法多为启发式算法.蚁群优化算法是受到自然界蚁群行为的研究启发而提出的一种用于求解组合优化问题的新型启发式随机搜索算法^[3-4].它采用正反馈机制实现分布式全局优化,通过信息素的不断累积和更新最终达到收敛于最优路径的目的,算法的特征

与网络路由优化问题的一些特征是可以互相匹配的.因此,随着对蚁群优化算法研究的不断深入,蚁群优化算法逐渐被成功运用于解决网络路由问题.文献[5]提出了基于蚁群算法的分布式 QoS 路由调度方法,文献[6]提出一种基于蚁群系统原理的 QoS 单播路由算法,文献[7]介绍了蚁群算法在 QoS 组播路由问题中应用.在选播路由方面,文献[8]提出了一种具有正反馈作用的分布式多蚁群算法,通过相互协调来调整单个蚂蚁的行为,使蚁群行为具有智能,且仅需要局部信息就能找到最优解.文献[9]提出了一种基于改进蚁群优化算法的选播路由算法

收稿日期: 2009-06-01; 修回日期: 2010-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(60963022); 广西自然科学基金项目(桂科自 0640026)

(IACA).从目前的研究现状来看,蚁群算法在多播路由和移动自组网的路由算法中的研究比较活跃,但在多 QoS 选播路由方面的研究应用还很少.

本文提出一种基于蚁群优化算法的多 QoS 选播路由算法,该算法在考虑了网络带宽、代价、端到端的时间延迟、包丢失率要求情况下,还充分考虑了网络路由的跳数及网络负载平衡情况,使得到的选播路由由路径更加合理.

2 QoS 选播路由问题的网络模型

一个选播服务网络可表示为加权图 $G = (V, E)$,其中, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示网络的有限节点集合, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 表示网络的双向链路集.用 $G(S) = \{s_1, s_2, \dots, s_p\} (p < n)$ 表示一组请求路由服务的源节点, $G(T) = \{t_1, t_2, \dots, t_q\} (q < n)$ 表示一组可向源节点提供相同服务的目的节点.为简化算法,本文只考虑无向图,且在网络中一对节点之间最多只有一条链路.

假设 P_b 表示带宽约束, P_d 表示时延约束, P_{pl} 表示包丢失率约束,从节点 i 到节点 j 的边 $e(i, j)$ 的带宽函数为 $\text{bandwidth}(e)$, 时延函数为 $\text{delay}(e)$, 包丢失率函数为 $\text{package_loss}(e)$, 费用函数为 $\text{cost}(e)$, 则一个满足带宽、时延、包丢失率约束的多 QoS 选播路由请求可表示为: $R = (s, G(T), P_b, P_d, P_{pl})$, 其目标是为每个源节点 $s \in G(S)$ 寻找一条从 s 到任何一个目的节点 $t \in G(T)$ 的传输路径 p , 使其满足:

- (1) 时延约束: $\text{delay}(p) \leq P_d$
 - (2) 带宽约束: $\text{bandwidth}(p) \geq P_b$
 - (3) 包丢失率约束: $\text{packet_loss}(p) \leq P_{pl}$
- 并使得路径 p 的总代价 $\text{cost}(p)$ 尽可能小.

3 算法的描述与实现

3.1 蚁群算法涉及三个主要规则

(1) 下一节点的选择规则

蚂蚁在完成路径选择过程中,处在节点 i 的第 k 只蚂蚁根据下面的公式来选择下一个节点 j :

$$j = \begin{cases} \arg \max_{u \in \text{allowed}_k} \{ \tau_{iu}^\alpha(t) \cdot \eta_{iu}^\beta(t) \} & q \leq q_0 \\ J & q > q_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, q 是在 $[0, 1]$ 区间服从均匀分布的随机数, q_0 是决定根据历史信息进行搜索路径还是随机探索新路径的参数, 当 $q \leq q_0$ 时, 以 q_0 的概率在已有最优

解空间进行搜索, 反之以随机方式探索新路径; allowed_k 表示 t 时刻蚂蚁 k 没有选择过的节点; $\tau_{iu}(t)$ 表示 t 时刻链路 (i, u) 上的信息素浓度, α 是信息素的作用程度, 即相对重要性; $\eta_{iu}(t)$ 表示由节点 i 转移到节点 u 的启发信息, 用来指示蚂蚁如何进行移动, β 是启发信息的作用程度.

在式(1)中, J 是由 t 时刻蚂蚁 k 从 i 节点到 j 节点的概率决定的, 的计算公式如下:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \cdot \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} \tau_{is}^\alpha(t) \cdot \eta_{is}^\beta(t)} & j \in \text{allowed}_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

公式中的启发信息 $\eta_{ij}(t)$ 的计算公式如下:

$$\eta_{ij} = \begin{cases} \xi_{\text{bandwidth}(e)} + \frac{1 - f_l \times \text{packet_loss}(e)}{f_d \times \text{delay}(e) + f_c \times \text{cost}(e)}, & j \in G(T) \\ 1.5 \times (\xi_{\text{bandwidth}(e)} + \frac{1 - f_l \times \text{packet_loss}(e)}{f_d \times \text{delay}(e) + f_c \times \text{cost}(e)}), & j \in G(T) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $f_c \in (0, 1)$, $f_d \in (0, 1)$, $f_l \in (0, 1)$ 分别是代价、时延和分组丢失率的权重, 它们将决定每条链路及最优路径的选取, 且 $f_c + f_d + f_l = 1$; $\xi_{\text{bandwidth}(e)}$ 是一个关于带宽的阶梯函数, 其取值范围如下: 当 $10 \leq \text{带宽值} < 20$ 时, 其值为 0.01; $20 \leq \text{带宽值} < 30$ 时为 0.02; $30 \leq \text{带宽值} < 40$ 时为 0.03; $40 \leq \text{带宽值} < 50$ 时为 0.04; 带宽值 ≥ 50 时为 0.05. 采用 $\xi_{\text{bandwidth}(e)}$ 函数主要是避免带宽大的链路过大影响该链路的启发信息, 从而得到一个综合考虑带宽、时延、代价和丢包率的启发信息, 使算法能得到较优的解路径.

(2) 信息素的全局更新规则

全局更新规则的作用是: 当所有的蚂蚁完成一条路径的选择后, 选择目标函数最小的一条路径 p , 用来完成全局信息素的更新, 以便能够保存目前的最优路径, 对以后的蚂蚁产生影响, 从而达到较快收敛于最优路径的目的. 如果 i, j 是相邻的节点, 则

$$\tau_g(i, j) = (1 - \rho_g) \times \tau_g(i, j) + \rho_g \times \Delta \tau_g(i, j) \quad (4)$$

$$\Delta \tau_g(i, j) = \begin{cases} Q/f & (i, j) \in p \\ 0 & (i, j) \notin p \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\rho_g \in (0, 1)$ 是全局信息素挥发系数, 表示信息素挥发快慢程度; Q 为常数, 用来控制蚂蚁完成一次寻路释放信息素的总量; f 是目标函数值.

(3) 信息素的局部更新规则

局部更新规则的主要作用是减少已经选择的边

对后来的蚂蚁的影响,从而使蚂蚁对没有被选择的边有更强的探索能力.当蚂蚁由 i 节点到 j 节点后,边 (i, j) 上的信息素按下面的公式来更新:

$$\tau_l(i, j) = (1 - \rho_l) \times \tau_l(i, j) + \rho_l \times \Delta\tau_l(i, j) \quad (6)$$

式中, $\rho_l \in (0, 1)$ 是局部信息素挥发系数, $\Delta\tau_l(i, j)$ 是蚂蚁经过边 (i, j) 后留下的信息素,其计算公式如下:

$$\Delta\tau_l(i, j) = \log(\text{bandwidth}_{ij}, \text{bandwidth_max}) + 1/\text{delay}_{ij} + 1/\text{cost}_{ij} \quad (7)$$

从以上公式可以看出,边 (i, j) 的代价越小、时延越小、带宽越大,留下的信息素越多.

3.2 算法改进的思路

为了使蚁群算法更加有效地解决多QoS约束的选播路由问题,克服其易于收敛于局部最小值等问题,我们对蚁群算法做了以下的改进:

(1) 算法连续 T_1 次收敛于同一条迭代最优路径时,把该路径上的信息素减少 $Q_1 \in (0, 1)$ 倍后继续运行;连续 $T_2 (T_2 > T_1)$ 次收敛于同一条迭代最优路径时,则认为通过减少信息素已经不足以跳出该局部最小值,此时算法复位,再次初始化信息素,并把目前发现的所有最优路径上的信息素减少 $Q_2 \in (0, 1)$ 倍,然后再继续运行.

(2) 当存在若干条较优的链路,这些链路很有可能被选择,并且选择这些链路后可能把蚂蚁引向其他节点而不能到达目的节点,从而导致算法效率低下.因此在一轮迭代中,有超过 $K\%$ 的蚂蚁死亡时,则把该轮迭代中死亡数最多的路径的信息素减少 $Q_3 \in (0, 1)$ 倍,启发信息减少 $Q_4 \in (0, 1)$ 倍,即认为蚂蚁选择该链路对到达目的节点没有益处,使其他蚂蚁改道.实验也发现,这对于大型网络特别有效.

(3) 如果算法在迭代一定次数后,只是简单重复已经找到的解路径,没有找到更新的路径,此时算法就会不停的复位.为此,当算法连续 T_3 次复位时,提前结束算法,以减少算法的运行时间.

实验表明,这些改进可以使算法快速跳出局部最小值,可以发现更多的有效路径,使找到的有效路径多样化,从而发现更优的全局解.

3.3 算法的描述及实现过程

本文提出的基于蚁群优化算法的多QoS选播路由算法(ACO-AR)的实现过程描述如下:

Step1: 为将选播路由问题映射到蚁群优化算法的框架,将网络中所有节点进行编号($v_i \rightarrow i, i = 1,$

$2, \dots, n$), 连接两节点间的链路记为边 $e = (i, j)$. 这里的 n 是网络的节点数.

Step2: 初始化. 设定算法运行的时间 t , 迭代次数 T , 蚁群大小 m , 每条路径上信息素的浓度 τ_0 及其启发信息 η , 信息素和启发信息作用程度参数 α 、 β , 信息素挥发系数 ρ_g, ρ_l , 代价、时延和分组丢失率的权重 f_c, f_d, f_l , 跳数和瓶颈带宽的加权系数 λ_h 和 λ_b , 所有蚂蚁均放在源节点. 其中 $\tau_0, \eta_0, \varphi_0$ 和 δ_0 按如下规则设定:

① 对于不能满足 QoS 约束的边 $e = (i, j)$, 设定其 $\tau_0 = 0, \eta = 0, \varphi_0 = 0, \delta_0 = 0$, 即该边不再参与算法的运算, 从而减少运行的时间.

② 对满足 QoS 约束的边 $e = (i, j)$, 设定其初始化信息素的浓度 τ_0, φ_0 和 δ_0 , 并按式(3) 设定启发信息 η .

Step3: 构造解. 每只蚂蚁各自按照式(1) 和式(2) 选择下一个节点, 不允许选择相同的节点. 选择节点后要估算已选路径是否满足时延、代价和丢包率的要求, 若不满足, 放弃该节点, 重新选择其他节点, 若无其他节点可选择, 则蚂蚁死亡; 若满足, 按照式(4) 更新信息素并继续搜索, 直到蚂蚁到达选播组的一个目的节点, 该蚂蚁停止搜索.

Step4: 所有蚂蚁停止搜索后, 本次迭代搜索结束, 计算每只蚂蚁构造的路径的目标函数值, 找出最优解, 并按上述的算法改进思路进行处理.

Step5: 如果满足终止条件, 则终止算法, 并转 Step6, 否则转 Step3 继续迭代.

Step6: 输出全局最优解; 若全局最优解为空, 则满足时 QoS 约束的播路由请求不能满足, 即请求的路径不存在, 应适当放宽对 QoS 约束的要求.

4 仿真实验与算法性能分析

4.1 算法的复杂度分析

设网络有 n 个节点, 平均每个节点有 k 个邻接节点, 算法有 m 只蚂蚁, 迭代 T 次, 则算法的初始化时间复杂度为 $O(n \cdot k)/2$, 算法复位的时间复杂度为 $O(n \cdot k)/2$. 每只蚂蚁选择下一节点的时间复杂度为 $O(k)$, 信息素全局更新的时间复杂度为 $O(n \cdot k)/2$. 故算法具有 $O(n \cdot k)/2 + O(T \cdot m \cdot n \cdot k) + O(T \cdot n \cdot k)/2$ 的时间复杂度, 在最坏情况下, 具有时间复杂度是 $O(T \cdot n^2)/2 + O(T \cdot m \cdot n^2) + O(T \cdot n^2)/2 = O(T \cdot m \cdot n^2)$, 可见算法的复杂度主要取决于网络的节点数.

4.2 实验结果及分析

实验中,随机生成一个 200 个节点的网络拓扑图(如图 1),其链路带宽在[10 ~ 60]之间、时延在[5 ~ 25]之间、代价在[3 ~ 20]之间、丢包率在[1 ~ 8]之间随机产生.设定蚂蚁的数量为 $m = 25$,迭代次数为 $T = 40$.其他参数取 $T_1 = 3, T_2 = 4, T_3 =$

$3, K = 0.8, Q_1 = 0.6, Q_2 = 0.25, Q_3 = 0.4, Q_4 = 0.5, \alpha = 1.2, \beta = 1, \tau_0 = 20, \rho_g = \rho_l = 0.12, Q = 300, q_0 = 0.65$,这些参数都是经过大量仿真实验获得的,选取这些参数可以获得较好的效果; $f_c = 0.6, f_d = 0.3, f_l = 0.1, \lambda_h = 1.2, \lambda_b = 1$.仿真实验主要对算法的有效性和收敛性进行性能分析.

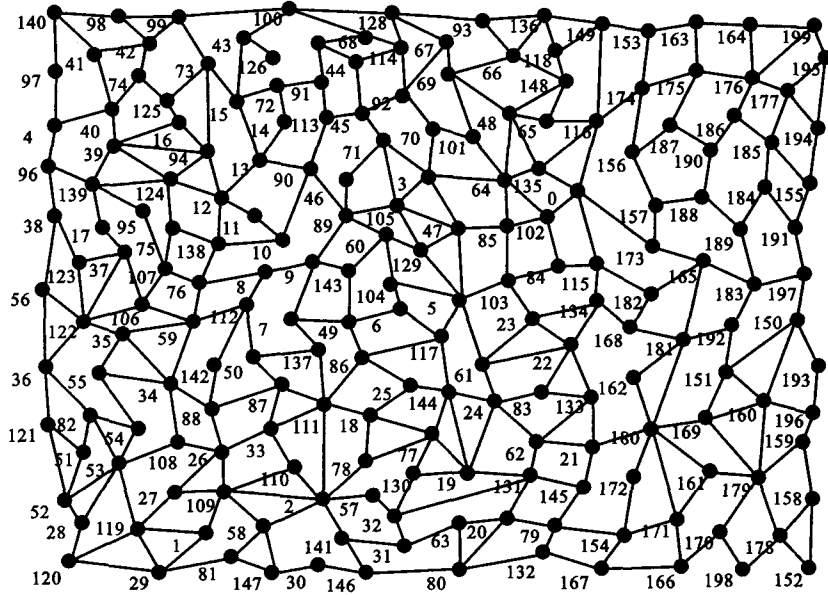


图 1 200 个节点的随机网络拓扑图

对于一个选播请求 $R = (s, G(T), P_b, P_d, P_{pl})$,其中 $s = 103, G(T) = \{198, 100, 124, 122, 29, 176\}, P_b = 25, P_d = 250, P_{pl} = 100$.算法共找到 31 个可行解,表 1 给出了前 5 个可行解,其中第一

个是最优解.从表中可看到,当路径的瓶颈带宽大时,其带宽占用率较低,网络负载均衡程度较好.这表明设计的目标函数是合理、可行的,它真实反映了路由路径的优劣,为算法找到更好的解提供了一个可行的选择标准.

表 1 算法找到的前 5 个可行解

Path(可行解)	f^{**}	B_p	D_p	$Cost_p$	L_p	$Usage_b(p)$	$Balance(p)$
103 → 85 → 64 → 48 → 69 → 67 → 128 → 100	1.695 80	24	82	73	29	0.527 7	0.035 1
103 → 5 → 117 → 144 → 77 → 78 → 2 → 58 → 81 → 29	1.939 55	37	143	123	36	0.421 1	0.004 5
103 → 5 → 117 → 86 → 111 → 2 → 58 → 81 → 29	2.152 62	24	108	98	29	0.467 2	0.024 7
103 → 85 → 64 → 48 → 69 → 66 → 93 → 67 → 128 → 100	2.515 35	24	91	103	45	0.532 4	0.025 8
103 → 5 → 117 → 86 → 111 → 18 → 77 → 78 → 2 → 58 → 81 → 29	2.576 01	35	146	150	44	0.424 4	0.006

** $f = \log_2(\text{目标函数值 } f / \text{网络节点数 } n)$

ACO-AR 算法与基于 Dijkstra 算法的选播路由算法和文献[10]提出的基于遗传算法的选播路由算法(GA 算法)的运行效率对比实验结果见图 2.

从图 2 可看出,本文算法的运行费用比另外两个算法要低.分析其原因,在本文算法中,由于每只蚂蚁在出发前不需要知道整个路径的信息和它将被传送到选播组的那个成员,只需根据转移概率表随机选取下一节点进行传输即可,故无需在初始化时计算所有路径度量参数与权重,能够在较大规模网

络中实现多目标多路径的选播路由.路由时,本文算法把数据包分散传输在网络各链路上,并利用数据包传输的历史信息来模拟路径信息素,使各节点获得选播组成员和链路的最新信息,简化了路由算法的复杂度.各节点根据路径的信息素和链路的可见度等综合生成转移概率表,为后面的蚂蚁选择路径提供依据.而 GA 算法只是根据既定的概率进行演化,不能根据实际的网络状况调整演化的策略,因此其波动幅度较大,收敛的速度相对较慢.

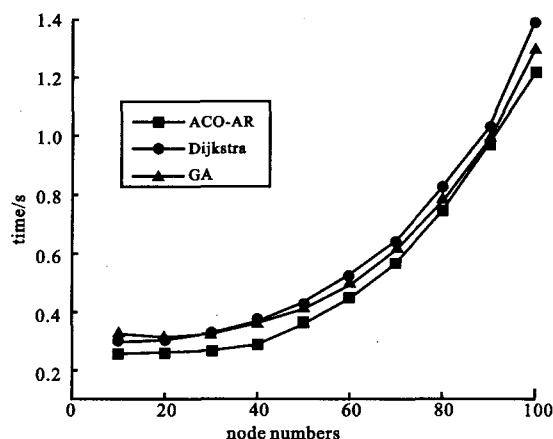


图2 ACO-AR 算法与其他算法的运行效率对比图

5 结束语

本文提出了一种基于蚁群算法的多QoS选播路由算法.该算法采用对迭代最优解路径上的信息素的调整和算法重启的策略,有效地解决了蚁群算法的易于陷入局部最优的缺陷.仿真结果表明,该算法能快速地找到满足QoS约束的全局最优解,并实现网络负载平衡,算法是有效且切实可行的.

参考文献:

- [1] Hinden R, Deering S. IP Version 6 addressing architecture [EB/OL]. (1998-07-15) [2009-12-19]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2373.txt>.
- [2] Weijia Jia, Xuan D, Zhao W. Integrated routing algorithms for anycast messages [J]. IEEE Communications Magazine, 2000, 38(1):48-53.
- [3] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part - B, 1996, 26(1):29-41.
- [4] 劳眷, 韦文代, 伍超奎. 蚁群算法求解旅行商问题若干改进策略研究[J]. 广西大学学报:自然科学版, 2008, 33(S1):113-116.
- [5] 吕国英, 刘泽民, 周正. 基于蚂蚁算法的分布式QoS路由选择算法[J]. 通信学报, 2001, 22(9):34-42.
- [6] 桂志波, 冀鑫泉. 一种基于蚁群系统原理的QoS单播路由算法[J]. 信号处理, 2003, 19(5):432-436.
- [7] 尹莹莹, 孙亮. 蚁群算法在QoS组播路由问题中应用[J]. 控制工程, 2006, 13(增刊):170-17.
- [8] Yu Jianping, Lin Yaping, Lin Mu, et al. Multi-constrained anycast routing based on ant algorithm[J]. Chinese Journal of Electronics, 2006, 15(1):133-137.
- [9] 李领治, 郑洪源, 丁秋林. 一种基于改进蚁群优化算法的选播路由算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2):340-344.
- [10] 陈燕, 宋玲, 李陶深. 基于遗传算法的求解时延约束的选播QoS路由算法[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(12):46-49.

作者简介:

李陶深 男, (1957-), 博士, 教授, CCF 高级会员. 研究方向为网络计算与路由算法分布式数据库等.

肖猛 男, (1984-), 硕士, CCF 学生会员. 研究方向为网络选播路由算法、蚁群算法.

葛志辉 男, (1980-), 博士, 副教授. 研究方向为无线 Mesh 网络性能优化、路由协议设计.

(上接第90页)

- [4] Mohan Kumar, Behrooz A Shirazi. Dynamic service composition in pervasive computing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(7):907-918.
- [5] Deng Shuiguang. Automatic web service composition based on backward tree[J]. Journal of Software, 2007, 18(8):1896-1910.
- [6] Andreas Friesen, Jens Lemcke. Composing web-service-like abstract state machines (ASM) [C]// IEEE SCW.

Germany, IEEE Computer Society, 2007:262-269.

作者简介:

曾慧清 女, (1987-), 硕士研究生. 研究方向分布式计算、普适计算.

黄林鹏 男, 博士, 教授. 研究方向程序设计语言、并行分布式计算、人工智能.

陈俊清 男, (1982-), 博士研究生. 研究方向分布式计算、普适计算、形式化分析.