

有导向变异算子的无线 Mesh 网 负载均衡算法研究^{*}

陆建波, 钟 智, 闭应洲

(广西师范学院 计算机与信息工程学院, 南宁 530001)

摘 要: 为了提高无线 Mesh 网络(WMN)的传输性能,提出基于有导向变异算子的进化算法 GM-EA(guided mutation EA)来优化 WMN 网关负载均衡问题。在已有的 WMN 负载均衡算法基础上,GM-EA 算法通过结合粒子群优化的方法,更好地利用种群中的全局信息,在较少迭代次数下可以达到网关数量和负载均衡两方面的优化。仿真实验表明,GM-EA 算法以增加执行时间为代价下得到的网关数量与比其他算法得到的结果更优;在网关负载均衡方面,该算法也取得较好的结果。

关键词: 无线 Mesh 网;有导向变异;负载均衡;GALib

中图分类号: TP393.01

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)04-1486-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.079

Guided mutation evolutionary algorithm for load-balance placement of gateways in wireless mesh network

LU Jian-bo, ZHONG Zhi, BI Ying-zhou

(College of Computer & Information Engineering, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China)

Abstract: To effectively solve the load balancing problem of WMN's gateway, this paper introduced a guided mutation evolutionary algorithm(GM-EA) based on the existing load-balanced strategies, which combined the idea from particle swarm optimization, utilized the global information in population. The evolutionary algorithm could achieve load balance placement of gateways in executing efficiency. Simulation results show that at the price of increasing of executing time the number of gateways generated by the evolutionary algorithm is better than the result from other gateway placement algorithms, and as far as the load balance of gateways is concerned, the evolutionary algorithm performs well.

Key words: wireless mesh network(WMH); guided mutation; load balance; GALib

0 引言

无线 Mesh 网络(WMN)是近几年出现的一种动态自组织、自我配置的具有数据接收和转发功能的多跳无线网络,它提供了更加灵活的无线宽带接入手段^[1]。无线 Mesh 网主要有两种类型的节点,即 Mesh 路由器和 Mesh 终端。有一些 Mesh 路由器与 Internet 直接相连,称为网关,WMN 的流量通过网关与 Internet 往来。所有 Mesh 路由器节点构成了 WMN 的骨干网,Mesh 终端用户的数据经由 Mesh 路由器的多跳传输到达网关,再通过网关的转发实现终端的 Internet 访问。无线 Mesh 网的显著特点是网络中大部分流量汇聚于网关,网关常常成为网络性能的瓶颈。在 WMN 中,网关节点越多其性能越好,但是成本也越高。网关部署问题就是在给定的节点中,选择最少数量的节点作为网关,并以这些网关节点为簇头进行分簇,使得这些簇互不相交,而且覆盖 WMN 中的所有节点,同时簇内的网络性能满足服务质量(QoS)要求^[2]。学者们把网关部署问题模型转换为线性规划优化问题,并针对不同的约束条件提出网关部署算法。文献[3]采用分簇的思想,把网关部署问题转换

为两个问题,并提出不同链路模型下的贪婪算法,一是求最小数量的不相交簇覆盖所有节点;二是每个簇以簇头(网关)为根,建立满足多个 QoS 条件的生成树作为数据传输树。文献[4]提出了 QoS 约束的网关部署贪婪算法。文献[2]提出一种启发式的混合算法,以最小化网关数量和网关之间的负载均衡为目标,利用遗传算法在多目标优化方面的优势,并与贪婪算法相结合来求解网关数量最小和网关负载均衡的网关部署策略。

基于有导向变异算子的进化算法^[5](GM-EA)是一种新的算法,该算法结合粒子群优化的方法,更好地利用当前最优解指导变异,在解决一些组合优化问题^[6]中取得了较好的效果。本文以 GM-EA 为基础,结合文献[2]的贪婪算法,以最小化网关数量和网关之间的负载均衡为目标,对无线 Mesh 网络中实现负载均衡部署问题进行求解。

1 网络模型及问题描述

1.1 网络模型

为研究 WMN 中的网关部署问题,本文用无向图 $G(V, E)$

收稿日期: 2011-07-13; 修回日期: 2011-08-23 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60763012,40761027);广西自然科学基金资助项目(0991104);广西师范学院青年科研基金资助项目(1110B002)

作者简介:陆建波(1977-),男,广西灵山人,讲师,硕士,主要研究方向为智能计算、软件工程(ljbhappy@sina.com);钟智(1963-),男,广西梧州人,副教授,主要研究方向为智能计算、知识工程;闭应洲(1967-),男,广西横县人,教授,博士,主要研究方向为智能计算、智能信息处理。

来表示 WMN 骨干网。图 1 中的节点 $v \in V$, 表示 WMN 中的路由器节点和网关节点。 V 中的每一个节点都有一个传输范围, 在该传输范围内的邻近节点都可与其直接通信, 用 $N(v)$ 表示节点 v 的邻接节点集合; 对任给的节点 $u \in N(v)$, 存在边 $e_{uv} \in E$, 边 e_{uv} 为 WMN 中的节点 v_u 和 v_v 之间的双向传输链路, 表示节点 v_u 和 v_v 彼此可以直接通信。集合 V 中存在一些通过有线电缆与 Internet 直接相连的网关节点, WMN 中的流量通过网关节点到达 Internet, 用 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$ 表示这些网关节点的集合。剩下的节点 $v \in \bar{G} = V - G$ 为普通的路由器节点, 其主要作用是汇集 Mesh 终端的流量, 并把这些流量转发至各自的网关节点。为研究方便, 用权值 $W(v)$ 来表示 Mesh 路由器 v 所汇集的终端流量。对任意网关节点 $g_i \in G$, 定义其负载为 $L(g_i) = \sum_{v \in \bar{G}} W(v_i) (v_i \in G)$, 且 v_i 的指定网关为 g_i 。如图 1 所示, 各路由器节点旁标明的是它的权值, 表示流量或者用户数, 网关 GW1 的负载为 43 (簇内所有节点权值之和), 网关 GW2 的负载为 48。

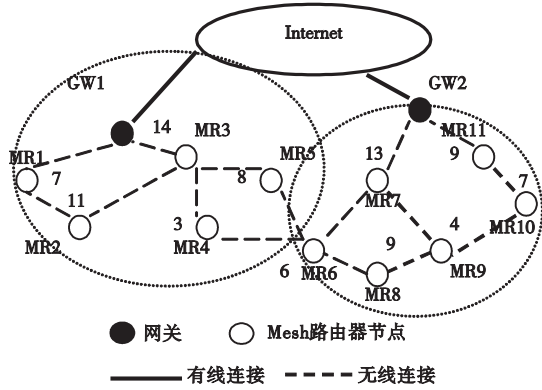


图1 网关的负载

1.2 问题描述

本文所研究的网关部署问题就是, 尽可能地保持网关数量最少和网关负载的均衡, 同时各簇的大小、节点的度以及节点与网关的距离满足上界 S, D 和 R 。该问题可以描述为整数线性规划优化问题:

$$\min K = |G|, \text{var} = \sqrt{\frac{1}{|G| - 1} \sum_{g_i \in G} (L(g_i) - \bar{L})^2} \quad (1)$$

s. t.

$$\forall v_j \in V, \sum_{g_i \in G} y_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$\forall v_j \in V, \sum_{g_i \in G} (d_{ij} \times y_{ij}) \leq R \quad (3)$$

$$\forall v_j \in V, \delta(v_j) \leq D \quad (4)$$

$$\forall g_i \in G, \sum_{v_j \in V} y_{ij} \leq S \quad (5)$$

$$\forall g_i \in G, L(g_i) = \sum_{v_j \in V} (y_{ij} \times W(v_j)) \quad (6)$$

其中, 定义 $x_i \in \{0, 1\}$, 对节点 $v_i \in V$, 如果 $v_i \in G$ (G 为网关集合), 那么 $x_i = 1$, 否则 $x_i = 0$; K 为网络中的网关数量; 定义 $y_{ij} \in \{0, 1\}$, 如果节点 v_j 的指定网关为 g_i , 那么 $y_{ij} = 1$, 否则 $y_{ij} = 0$; 定义 $\delta(v)$ 为节点 v 在簇内的度数; 定义 d_{ij} 为节点 v_i 与 v_j 之间的最短距离, 以跳数为单位; var 为网关负载的样本标准差, $\bar{L} = \frac{1}{|G|} \sum_{g_i \in G} L(g_i)$ 为网关负载的平均值。式(2)表示任何一个节点有且仅有一个指定网关; 式(3)表示任一节点与其指定网关的最短距离不超过 R 跳; 式(4)表示任一节点在簇内的度数不超过上限 D ; 式(5)表示指定网关相同 (同一簇) 的节点数

不大于上限 S ; 式(6)表示网关的负载为簇内所有节点的权值之和。如上所述, 网关负载均衡的部署问题转换成整数线性规划优化问题, 该问题是 NP 难的问题^[4]。

2 基于有导向变异算子的进化算法

面对爆炸性的搜索空间, 随机搜索是无效的, 必须使搜索集中于包含高质量解的区间进行。根据近似最优原理, 好的解是相似的, 因此围绕已知最优解来产生新的解是合理的。但对已知最优解的利用使得在加快搜索进程向较优解接近的同时, 往往导致早熟收敛。文献[5]提出的有导向变异算子的进化算法将搜索过程分为勘探阶段与开采阶段。在早期勘探阶段, 只有新个体比旧个体更好时才能取代旧个体; 而在后期开采阶段, 采用 Boltzman 选择决定是否用新个体取代旧个体, 目的是允许以一定的小概率接受差解, 使得搜索可以跳出局部最优。

有导向变异算子的进化算法可描述为:

a) 有导向的变异算子以概率 ($p = 0.2 \sim 0.5$) 选择当前最优解指导变异, 以概率 $1 - p$ 从种群中随机选择另一个个体指导变异;

b) 对个体进行变异运算后立即评估, 在早期勘探阶段, 只有新个体比旧个体更好时才能取代旧个体; 而在后期开采阶段, 采用 Boltzman 选择决定是否用新个体取代旧个体。

3 无线 Mesh 网络中实现负载均衡部署问题的求解

本文采用 GM-EA 算法和网络分簇的贪婪算法^[2]相结合的混合算法求解无线 Mesh 网络中实现负载均衡的部署问题。虽然贪婪算法比较容易陷入局部最优, 但与 GM-EA 中其他一些保持群体多样性与增强搜索能力的技术结合起来, 陷入局部最优的几率很小。下面为混合算法的描述。

```

初始化种群  $P_0, t = 0$ ;
计算  $P_0$  中个体的适应值 (目标函数);
while (不满足进化终止条件) do {
    for (种群  $P_t$  中的每个个体  $S_i$ ) do {
        for (个体  $S_i$  的每位基因) do {
            if (rand()  $\leq p$ ) {
                基因位由上一代最优个体指导变异;
            }
            else {
                基因位由上一代随机个体指导变异;
            }
        }
    }
    采用网络分簇贪婪算法修正个体, 保证解的可行性;
    评估新个体 (目标函数);
    if (勘探阶段) {
        只有新个体比旧个体好时才能取代旧个体;
    }
    else (开采阶段) {
        采用 Boltzman 选择决定是否用新个体取代旧个体;
    }
    t = t + 1;
}

```

4 实验设计与实验结果

4.1 实验设计

Galib^[7] 是美国 MIT 的 Matthew Wall 用 C++ 语言开发的一套遗传算法类库。本文以 Galib 2.44 为基础, 对个体的编码形式、变异算子、评估算子、比较算子、进化算法进化策略、动态

参数设置、适应 MFC 应用程序开发等方面进行了精心的扩展,以实现基于有导向变异算子的进化算法程序。

本文应用网络分簇的贪婪算法随机生成初始种群。种群中个体(染色体)用二进制串表示,若第 i 位为 1,表示节点 i 为网关节点;否则为普通的路由器节点。定义个体 I_k 的适应度函数为 $I_k = \lambda_1 \frac{n - c(I_k)}{n} + \lambda_2 \frac{Q - \text{var}(I_k)}{Q}$ 。其中, λ_1 、 λ_2 为加权系数, $c(I_k) = \sum_{i=1}^n b_i^{(k)}$ 为网关数量, n 为网络总节点数; $\text{var}(I_k)$ 为个体 I_k 所代表的网关部署方案中网关负载的样本标准差, $Q = \max \{ \text{var}(I_i) | 1 \leq i \leq n \}$ 。

4.2 实验仿真

为验证 GM-EA 算法的有效性,本文进行了仿真实验。计算机实验平台为:1.66 GHz(双核)CPU, 1 GB 内存,操作系统 Windows XP,开发工具 VC++6.0。

实验在 15×15 的区域随机放置 150 个节点,生成 500 个网络拓扑图,节点权值在 $[1, 20]$ 随机取值。分别应用基于有导向变异算子的进化算法(GM-EA)与文献[2]提出的 Greedy_Partition 算法(图中略为 Greedy)和 GA_Placement 混合算法(图中略为 GA)对随机图构造满足跳数上限 R 、节点度数上限 D 和簇大小上限 S 的网关部署方案。对实验结果从以下两方面进行分析:a)网关数量比较;b)网关负载均衡的比较。实验中,GA_Placement、GM-EA 参数取值为: $\lambda_1 = 0.95$ 、 $\lambda_2 = 0.05$,种群大小 $N = 20$,进化代数 $\text{GEN} = 50$;GM-EA 算法中,无交叉算子,变异概率取 0.25,以 0.5 的概率应用当前最优解来指导变异,以 0.5 的概率从种群中随机选择另一个体指导变异,搜索过程分为两个阶段,早期的 20 代为勘探阶段,经变异产生的新个体必须有改进才能取代旧个体,从 21 代开始进入开采阶段,基于 Boltzman 选择决定是否用新个体取代旧个体。各种情况下三种算法得到的网关数量平均值结果如图 2~4 所示。从图中可见,本文引入的 GM-EA 算法得到的网关数量要优于另两种算法得到的数据。各种情况下三种算法构造的网关部署方案的网关负载均衡情况如图 5~7 所示。图中明显可见,GM-EA 算法取得的 var 值与 GA_Placement 取得的数据接近,但远低于 Greedy_Partition 算法取得的值。因此,GM-EA 混合算法实现了网关部署的网关负载均衡。

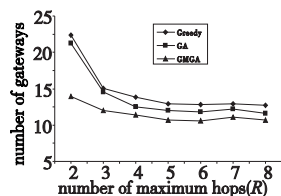


图2 R取值对网关数量的影响($D=6$ 、 $S=20$)

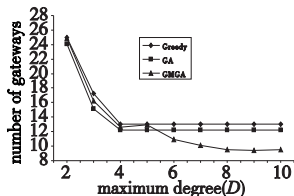


图3 D取值对网关数量的影响($R=4$ 、 $S=20$)

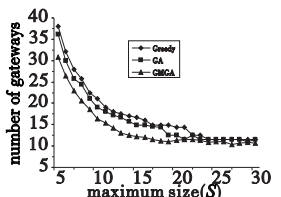


图4 S取值对网关数量的影响($D=6$ 、 $R=4$)

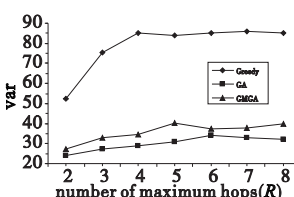


图5 R取值对网关负载均衡的影响($D=6$ 、 $S=20$)

4.3 算法执行时间分析

为比较算法的执行时间,实验分别在 7×7 、 9×9 、 10×10 、

11×11 、 12×12 、 14×14 、 15×15 的区域随机放置 30、50、70、90、110、130、150 个节点,各生成 100 个网络拓扑图,分别应用 GM-EA 算法、Greedy_Partition(表中略为 Greedy)算法和 GA_Placement(表中略为 GA)混合算法进行求解,得到各算法的执行平均时间如表 1 所示。

表 1 三种算法执行时间比较 ms

算法	节点数						
	30	50	70	90	110	130	150
Greedy	1.2	2.5	5.4	7.8	10.3	13.6	16
GA	222.8	238.5	301	367.5	476.5	617	1137
GM-EA	312.5	429.8	539	679.8	894.8	1159.8	1308

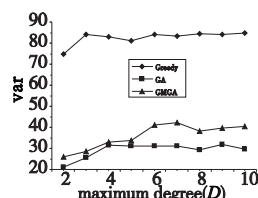


图6 D取值对网关负载均衡的影响($R=4$ 、 $S=20$)

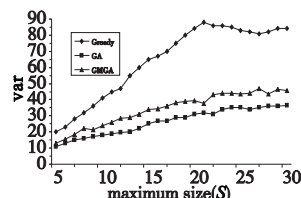


图7 S取值对网关负载均衡的影响($D=6$ 、 $R=4$)

从表 1 中可见, Greedy_Partition 算法有最快的执行速度, GA_Placement 算法次之, GM-EA 算法由于其迭代寻优的特点,执行速度较慢。但是,由于网关部署方案是在网络设计阶段制定,对算法执行时间相对不敏感, GM-EA 以其良好的表现仍可适用。

5 结束语

本文在分析已有算法的基础上,以最小化网关数量和网关之间的负载均衡为目标,研究满足 QoS 约束的网关部署问题。本文引入了基于有导向变异算子的进化算法与贪婪算法相结合的混合算法,该算法通过结合粒子群优化的方法,更好地利用种群中的全局信息,在较少迭代次数下可以得到较优的解。仿真实验表明,本文引入的混合算法以增加执行时间为代价下得到的网关数量优于其他算法得到的结果;在网关负载均衡方面,也取得较好的结果,实现了网关数量与负载均衡的双重优化。

参考文献:

- [1] 董超,陈贵海,王海. 无线网状的 QoS 研究[J]. 软件学报, 2009, 21(6): 1539-1552.
- [2] 曾锋,陈志刚,赵明,等. 无线 Mesh 网中实现网关负载均衡部署的混合算法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(10): 3029-3034.
- [3] BEJERANO Y. Efficient integration of multihop wireless and wired networks with QoS constraints[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2004, 12(6): 1064-1078.
- [4] AOUN B, BOUTABA R, IRAQI Y, et al. Gateway placement optimization in wireless mesh networks with QoS constraints[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(11): 2127-2136.
- [5] 闭应洲,陆建波,丁立新,等. 基于有导向变异算子的 GM-EA 算法[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(4): 1249-1251.
- [6] 陆建波,闭应洲,龙琰,等. 基于有导向变异算子求解多维背包问题[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(15): 36-38.
- [7] Matthew Wall[EB/OL]. <http://lancet.mit.edu/ga/>.