

基于遗传算法的定向天线网络拓扑控制

王亚利¹, 冯有前¹✉, 刘志国², 尹忠海¹, 孙 强¹

(1. 空军工程大学基础部, 西安, 710051; 2. 西安导航技术研究所, 西安, 710068)

摘要 针对定向天线网络拓扑中拓扑结构的设计的问题,综合考虑了网络中节点的最大度、最大通信距离、连通度等因素,着重考虑构建一个 k 连通的通信网络拓扑,这个特性很好地保证了网络的抗毁性与可靠性。基于此建立了最优 k -连通的网络拓扑模型,提出一个节点间的新的连接方式作为一个固定的模版,以此来确保网络的连通性。在此基础上利用遗传算法来对连接方式进行优化,给出了一种有效的编码方式,并且采用有序交叉作为交叉运算,避免了每次交叉后的个体网络连通性检查,降低了交叉运算的时间复杂度,同时保护了染色体中较好的模式被遗传到子代个体。找出了节点间更好的拓扑连接形式,通过仿真实验得到了很好的结果。

关键词 定向天线;网络拓扑;遗传算法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.02.009

中图分类号 TP393 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)02-0051-05

Directional Antenna Network Topology Control Based on Genetic Algorithm

WANG Yali¹, FENG Youqian¹✉, LIU Zhiguo², YIN Zhonghai¹, SUN Qiang¹

(1. Basic Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Xi'an Research Institute of Navigation Technology, Xi'an 710068, China)

Abstract: In view of the importance of topology structure design in directional antenna network topology, this paper takes the maximum node degree, the maximum communication distance, connectivity and other factors into consideration comprehensively, and focuses on the construction of a k -connecting communication network topology thus ensuring the survivability and reliability of the network. For the above-mentioned reasons, a network topology model of optimal k -connecting is established. The paper presents a new way of connection between the nodes as a fixed template to ensure the communication of the network. On the basis of this template, the genetic algorithm is used to optimize the connection mode, an efficient encoding method is presented, and the ordered cross is adopted to be a crossover. By so doing, individual network connectivity checks are avoided after each crossover operation, the time complexity of the crossover operation is reduced, and in the meantime the good pattern in the chromosome is inherited to the next individual generation. As a result, better topological nodes connection is found out. The result shows that the effectiveness is very satisfied.

Key words: directional antenna; network topology; genetic algorithm

收稿日期: 2017-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(61472443)

作者简介: 王亚利(1979—),女,陕西宝鸡人,讲师,博士,主要从事现代通信理论与技术研究。E-mail: yayahope@163.com

通信作者: 冯有前(1960—),男,陕西富平人,教授,博士生导师,主要从事雷达信号处理、密码学研究。E-mail: fengyouqian123@163.com

引用格式: 王亚利,冯有前,刘志国,等. 基于遗传算法的定向天线网络拓扑控制 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(2): 51-55. WANG Yali, FENG Youqian, LIU Zhiguo, et al. Directional Antenna Network Topology Control Based on Genetic Algorithm [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(2): 51-55.

在通信网络中,所谓拓扑结构则指的是无线节点的分布及其节点之间存在的逻辑链路。拓扑结构是路由选择的基础,同时,路由选择协议却需要节点来提供拓扑结构的有关信息,网络拓扑结构与路由机制相互牵连。由于网络需要均衡性、高抗毁性等性质,因此,拓扑结构的产生需要通过一定的优化方式来实现,特别是考虑到网络的抗毁性,则需要交感网络形成一个 k 连通拓扑^[1],即网络中任意失去 $k-1$ 个节点依然保持连通,但基于节点天线数量等方面的限制,拓扑图的边数又不宜过多,这正是我们所面临的困难。为了保证网络管理过程中的通信性能,必须给出适当的通信阶段的网络拓扑管控协议,以产生具有最佳效果的通信拓扑。要求求解模型稳定,算法运算量低,可满足实时性需求。

定向天线网络拓扑控制目前已经逐渐地成为Ad Hoc网络^[1-4]研究的热点,并且是网络中的主要技术之一,但现阶段出现的成果并不多,而且算法大多处于理论研究阶段,并不十分完善,还有很多方面需要进一步深入研究,例如,对于异构网络^[5-7],即网络中存在单向链路的情况和网络拓扑状态动态改变时的拓扑控制算法^[8-10]还较少。因此,有必要对Ad Hoc网络进行拓扑控制,为其设计比较完善的拓扑控制算法是亟待解决的问题。

在无线网络中,许多集中和局部的几何结构已经被用来进行拓扑控制。例如,最小生成树^[11-12],相对邻近图^[13-14], Gabriel图^[15-16], Delaunay三角形^[17-18], Yao图等。

定向天线的无线自组织网络拓扑控制的基本目标是维持网络的连通性(k 连通, $k \geq 1$),优化网络吞吐量,从理论上可将该任务归纳为寻找完全图的一个子图,使得拓扑子图的最长边最短,且满足节点最大度上限、 k 连通下限、射频隐身等条件限制。

目前我们所面临的关键技术挑战是如何构建一个 k -连通的通信拓扑。当前国际上对该问题展开研究的团队不多,主要有一个加拿大的团队,从2008年开始公开发表相关研究成果^[19],2014年又有诸多论文发表,采用的是纯算数分析的方法,主要研究有向图的强连通性,试图给出强连通的充分条件,其结论看起来很好,但所给出的条件与实际情况不符,因此,其应用价值不高。

1 定向天线网络拓扑问题

1.1 拓扑优化问题的描述

给定位于二维平面或三维空间中定向天线的无线自组织网络,天线指向可任意调整,每对节点间的

一对天线对准后只能建立一条链路,相当于图中的一条边,因此可将网络抽象为一个图 $G(V, E)$,其中网络节点即为图的节点。

具体的,我们把一个多跳无线网络拓扑可以看作一个无向连通图 $G=(V(G), E(G))$,其中 $V(G)=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示节点(顶点)集, E 表示边集合(链路集合)。首先定义一个具有 n 个节点网络的拓扑结构空间, n 个节点的完全图共有 $n(n-1)/2$ 条边,由这些边生成的每个子集都对应一个网络拓扑结构,这些网络组成一个拓扑空间。由于这些网络拓扑结构是根据经验或某些设计策略得到的,并没有从理论上证明其在网络拓扑性能方面能够达到最优目标,而本文算法的目标是当 n 确定后,要在这个网络拓扑空间中寻找最长通信距离最短来作为目标函数,这种计算方法,很容易知道完全图的性能最优。因此本文利用遗传算法具有的全局快速搜索能力,试图来寻找一些更优的网络拓扑结构。

1.2 拓扑连接方式设计

以下概念辅助说明网络拓扑控制算法的设计。

定义1(可见邻居) 可见邻居 N_u^V 是由节点 u 可以利用最大传输功率能到达的节点集合即: $N_u^V = \{v \in V(G); (u, v) \in E(G)\}$ 。对每一个节点 $u \in V(G)$,令 $G_u^V = (V(G_u^V), E(G_u^V))$ 为由 $V(G_u^V) = N_u^V$ 诱导出的 G 子图。

定义2(邻居集) 节点 v 是节点 u 的出邻居(u 是节点 v 的入邻居),算法ALG(Application Layer Gateway, ALG)生成拓扑当且仅当存在一边 (u, v) ,记为 $u \xrightarrow{\text{ALG}} v$,利用 $u \rightarrow v$ 表示 G 中的邻居关系。 $u \xrightarrow{\text{ALG}} v$ 表示 $u \xrightarrow{\text{ALG}} v$ 和 $u \xrightarrow{\text{ALG}} v$ 同时成立。

节点 u 的出邻居集为: $N_{\text{ALG}}^{\text{out}}(u) = \{v \in V(G); u \xrightarrow{\text{ALG}} v\}$;

节点 u 的入邻居集为: $N_{\text{ALG}}^{\text{in}}(u) = \{v \in V(G); v \xrightarrow{\text{ALG}} u\}$ 。

定义3(度) 在算法ALG下节点 u 的出度(u 出邻居数)为 $\text{deg}_{\text{ALG}}^{\text{out}}(u) = |N_{\text{ALG}}^{\text{out}}(u)|$ 。

类似,在算法ALG下节点 u 的入度(u 入邻居数)为 $\text{deg}_{\text{ALG}}^{\text{in}}(u) = |N_{\text{ALG}}^{\text{in}}(u)|$ 。

定义4(拓扑) 算法ALG下节点 u 生成的拓扑是一有向图 $G_{\text{ALG}} = (E(G_{\text{ALG}}), V(G_{\text{ALG}}))$ 。

这里 $V(G_{\text{ALG}}) = V(G)$, $E(G_{\text{ALG}}) = \{(u, v); u \xrightarrow{\text{ALG}} v, u, v \in V(G_{\text{ALG}})\}$ 。

定义5(半径) 半径 R_u 被定义为节点 u 和它最远距离的邻居的欧式距离,即 $R_u = \max_{v \in N_{\text{ALG}}^{\text{out}}(u)} \{d(u, v)\}$ 。

下面对约束条件作出分析:

1)节点最大度约束。

由于连接或处理能力的限制,每节点同时建立的链路数受限,不能超 A 条,故可假设节点度上限为 A ,节点度约束可表示为:

$$\max_{u \in V(G)} \{deg_{ALG}(u)\} \leq A$$

2)最大通信距离。

设最大通信距离为 L ,则图中各边长度均小于 L ,最大通信距离约束可表示为:

$$R_u = \max_{v \in N_{ALG}(u)} \{d(u,v)\} \leq L, \forall u \in V(G)$$

3)连通度。

为保证网络运行的抗毁性与可靠性,必须保证有节点故障时网络的连通性,这一特性可归结为 k -连通性,设图 G 的连通度为 $\kappa(G)$,则连通度约束可表示为 $\kappa(G) \geq k$ 。

下面建立以最长通信距离最短为目标的优化模型:

$$\min(\max\{\omega(e) | e \in G'(V, E')\})$$

$$\text{s. t. } G'(V, E') \subseteq G(V, E)$$

$$\kappa(G') \geq k$$

$$R_u = \max_{v \in N_{ALG}(u)} \{d(u,v)\} \leq L, \forall u \in V(G)$$

$$\max_{u \in V(G)} \{deg_{ALG}(u)\} \leq A$$

模版上节点间的连接方式的确定:第 1 层是 1~6 共 6 个节点顺序排列;第 2 层是 7~12 也是 6 个节点,在模版上显示出来就是第 1 层第 i 个节点 $i+6$;第 3 层是 13~24 共 12 个节点,在模版上显示出来是第 2 层节点一边为 $i+6$,一边为 $i+12$ 。

2 基于遗传算法的网络拓扑优化

遗传算法^[20-22]是 1962 年密西根大学 Holland 教授首次提出的一种全局优化算法,它借用了生物遗传学的观点,通过自然选择、遗传、变异等作用机制,实现各个体的适应性的提高,并迅速推广到优化、搜索、机器学习等方面。

2.1 算子设计

2.1.1 交叉操作

本文采用的是有序交叉法,即:

- 1)对 2 个个体随机选取 2 个相同的交叉点;
- 2)2 个父代个体交换 2 个交叉点的中间部分;
- 3)采用部分映射的方法替换交换后重复的城市序号。

2.1.2 变异操作

随机选择同一个个体的 2 个点进行交换。即随机产生 2 个 $[1, n]$ 范围内的整数,确定 2 个位置,将其对换位置即可。

2.1.3 进化逆转操作

产生 2 个 $[1, n]$ 区间内的随机整数,确定 2 个位置,将其间序列进行逆转。

2.2 算法步骤

基于遗传算法的网络拓扑结构优化的主体算法主要有 4 部分:适应度计算、选择运算、交叉运算、变异运算,从初始群体开始,循环执行这 4 步运算,每轮循环都产生一个子代群体,直到预定义的进化代数循环完毕。

具体的算法如下:

Step1 随机产生 p 个初始个体,给定进化代数 G ,选择概率 p_i ,交叉概率 p_c ,变异概率 p_m ;

Step2 利用欧式距离得到网络节点间距离,根据定义计算个体的适应度;

Step3 选取该代群体体中的最优个体,保存为“Bestindividual”。用赌盘选择方式选取 $p-1$ 个个体,用于交叉运算;

Step4 将 **Step3** 得到的群体随机配对,按照 2.1.1 节介绍的方法进行个体染色体交叉,得到 p 个子代个体;

Step5 变异,根据概率 p_m 决定在每个个体是否进行变异操作,按照 2.1.2 介绍的方法进行个体染色体变异、得到 p 个子代个体,并采取 2.1.3 中的逆转操作对个体进行逆转。搜索出该代的最优个体并用 Bestindividual 代替;

Step6 循环 **Step2** 至 **Step5** 直到完成预先定义的进化代数 G ;

Step7 输出最优个体 Bestindividual。

算法的进化过程见图 1。

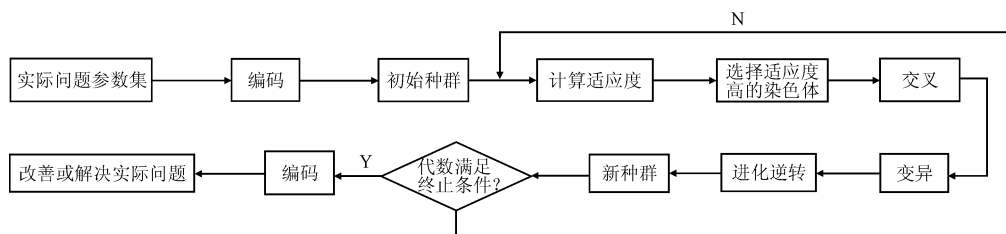


图 1 进化流程图

Fig. 1 Evolutionary flowchart

3 仿真分析

对具有大规模节点的网络空间搜索时,算法实现的速度明显缓慢下来。本文试验的规模为 24 个节点,群体规模为 1 000 个个体,进化代数为 100 代,连通度 $k=3$,交叉概率 0.95,变异概率取成 0.8。图 2 为网络最优轨迹图,图 3 为最优值的优化结果。

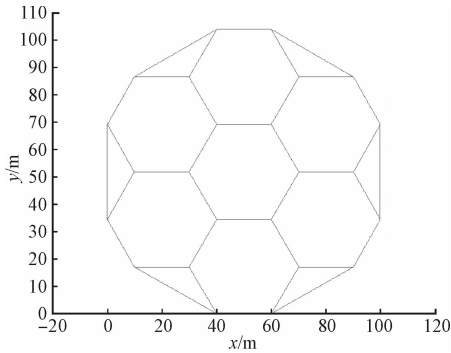


图 2 网络最优轨迹图

Fig. 2 The optimal network trajectory map

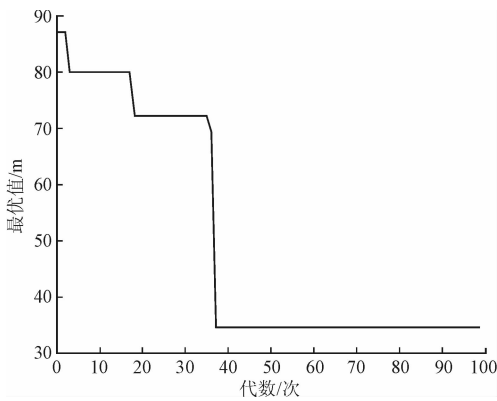


图 3 最优值进化过程示意图

Fig. 3 The optimal value evolution progress diagram

给定初始种群的一个随机值:

22→6→3→16→11→7→17→14→8→5→21→
19→15→1→23→2→4→18→24→13→9→20→10→
12→22

总距离:2 007.716 3,最长距离:100;

输出结果:

最终寻找到的最优解的一个连接顺序:

1→2→3→4→5→6→7→8→9→10→11→12→
13→14→15→16→17→18→19→20→21→22→23→
24→1

总距离:807.846 1,最长距离:34.641。

我们给出了一个 24 个节点的特殊的连接关系,通过仿真我们发现,即使给出一个任意的连接顺序,它最后还是找到那个最优的连接顺序来,使得链路节点的最长距离最小。选择了遗传算法作为寻优

工具,从图 3 中我们可以看到,函数值迅速下降,迭代到 34 代时已经找到了最优解,寻优效果很好。

4 结语

本文提出一种基于遗传算法的最优定向天线网络拓扑的问题求解方法,算法采用有序交叉作为交叉运算的交换对象,避免了每次交叉后的个体网络连通性检查,降低了交叉运算的时间复杂度,同时保护了染色体中较好的模式被遗传到子代个体。这里我们用了一个的固定模版作为节点之间的连接方式,解决了 k -连通网络的通信拓扑寻优问题。

参考文献(References):

- [1] 余夕亮. 基于 k 连通的 WSN 拓扑控制算法研究与改进 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2008.
YU X L. The Research and Improvement of Topology Control Algorithm Based on k -Connected in WSN [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2008. (in Chinese)
- [2] 张学, 陆桑璐, 陈贵海, 等. 无线传感器网络的拓扑控制 [J]. 软件学报, 2007, 18(4): 943-954.
ZHANG X, LU S L, CHEN G H, et al. Topology Control for Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Software, 2007, 18(4): 943-954. (in Chinese)
- [3] YAZDANI N, NAYYERI A, ZARIFZADEH S. Energy-Efficient Topology Control in Wireless Ad Hoc Networks with Selfish Nodes [J]. Computer Networks, 2012, 56(2): 902-904.
- [4] KAWADIA V, KUMAR P R. Power Control and Clustering in Ad-Hoc Networks [C] // Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications (INFOCOM). San Francisco, CA, USA: IEEE Press, 2003: 459-469.
- [5] LIN J, HOU C. Topology Control in Heterogeneous Wireless Networks Problems and Solutions [C] // Twenty-Third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Hong Kong, China: IEEE, 2004: 284-293.
- [6] MAVROMOUSRAKIS C X, KARATZA H D. Performance Measure of Stream-Oriented Power Consumption for Asymmetrical Communication in Wireless Ad-Hoc Networks [C] // ANSS'07. Norfolk, VA, USA: IEEE, 2007: 310-317.
- [7] LIU J, LI B. Distributed Topology Control in Wireless Sensor Networks with Asymmetric Links [J]. Global Telecommunications Conference, 2004, 3(3): 1257-1262.
- [8] 邹仕洪, 程时端. 一种多速率移动自组网中的拓扑控

- 制算法 [J]. 软件学报, 2004, 15(12): 1869-1876.
- ZOU S H, CHENG S D. A Multi-Rate Aware Topology Control Algorithm in Mobile Ad Hoc Networks [J]. Journal of Software, 2004, 15(12): 1869-1876. (in Chinese)
- [9] 沈中, 常义林, 崔灿, 等. 一种建立可自维护且具有最小能量特性的无线网络的分布式拓扑控制算法 [J]. 计算机学报, 2007, 30(4): 569-578.
- SHEN Z, CHANG Y L, CUI C, et al. A Distributed Topology Control Algorithm of Constructing Self-Maintainable Minimum Energy Wireless Networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(4): 569-578.
- [10] CHEN B J, JAMIESON K, BALAKRISHNAN H, et al. Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad-Hoc Wireless Networks [J]. Wireless Networks, 2002, 8(5): 481-494.
- [11] 路纲. 无线自组织网络拓扑结构研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- LU G. Study on Topology of Wireless Ad-Hoc Networks [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [12] YAO A C. On Constructing Minimum Spanning Trees in k -Dimensional Spaces and Related Problems [J]. SIAM Journal Computing, 1977, 11(4): 721-736.
- [13] GABRIEL K R, SOKAL R R. A New Statistical Approach to Geographic Variation Analysis [J]. Systematic Zoology, 1969, 18(3): 259-278.
- [14] 路纲, 周明天, 牛新征, 等. 无线网络邻近图综述 [J]. 软件学报, 2008, 19(4): 888-911.
- LU G, ZHOU M T, NIU X Z, et al. A Survey of Proximity Graphs in Wireless Networks [J]. Journal of Software, 2008, 19(4): 888-911. (in Chinese)
- [15] JONES C E, SIVALINGAM K M, GRAWAL A, et al. A Survey of Energy Efficient Network Protocols for Wireless Networks [J]. Wireless Networks, 2001, 7(4): 343-358.
- [16] BOSE P, DEVROYE L, EVANS W, et al. On the Spanning Ratio of Gabriel Graphs and β -Skeleton [J]. SIAM Journal on Discrete Mathematics, 2002, 2286(2): 479-493.
- [17] 张作锋, 刘三阳, 冯海林. 应用 Delaunay 图的拓扑控制 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(5), 105-107.
- ZHANG Z F, LIU S Y, FENG H L. Applying Delaunay Graph to Topology Control [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(5): 105-107. (in Chinese)
- [18] 徐明海, 张俨彬, 陶文铨. 一种改进的 Delaunay 三角形化剖分方法 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(2): 100-105.
- XU M H, ZHANG Y B, TAO W Q. An Improved Method of Delaunay Triangulation Subdivision [J]. Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2001, 25(2): 100-105. (in Chinese)
- [19] DOBREV S, KRANAKIS E, KRIZANC D, et al. Strong Connectivity in Sensor Networks with Given Number of Directional Antenna of Bounded Angle [J]. The 4th International Conference on Combinatorial Optimization & Applications, 2010, 6509(3): 72-86.
- [20] SHU J L, ZHAO Z, DAI Q Y. Genetic Algorithm for TSP [J]. Operations Research & Management Science, 2004, 13(1): 17-22.
- [21] 邓先习. 遗传算法求解 TSP 问题的研究与改进 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- DENG X X. Research and Improvement on Genetic Algorithm for Solving TSP [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008. (in Chinese)
- [22] 向佐勇, 刘正才, 申平安. 一种改进的基于进化阶段的自适应遗传算法 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(1): 133-136.
- XIANG Z Y, LIU Z C, SHEN P A. An Improved Adaptive Genetic Algorithm Based on Evolutionary Stages [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(1): 133-136. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)