

控制与决策

Control and Decision

一种基于双编码遗传算法的机动微波接力网组网方法

陈克斌, 鲁云军, 韩梦瑶, 金乙乔

引用本文:

陈克斌, 鲁云军, 韩梦瑶, 等. 一种基于双编码遗传算法的机动微波接力网组网方法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(12): 2915–2922.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0347>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[双层相依网络化指挥信息系统级联失效研究](#)

Cascading failure of double layer networked command information system

控制与决策. 2020, 35(12): 3017–3025 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0696>

[基于超级节点的分布式传感器节点定位算法](#)

A distributed sensor nodes localization algorithm based on super nodes

控制与决策. 2020, 35(12): 2898–2906 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0219>

[异构网络中基于鸽群优化算法的D2D资源分配机制](#)

Resource allocation for D2D based on pigeon-inspired optimization algorithm in heterogeneous networks

控制与决策. 2020, 35(12): 2959–2967 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0526>

[事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 \$H_\infty\$ 故障检测](#)

Event-triggered H_∞ fault detection for networked control systems with distributed delays

控制与决策. 2020, 35(12): 3059–3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

[可持续逆向物流网络设计研究进展及趋势](#)

Progress and prospects of sustainable reverse logistics network design

控制与决策. 2020, 35(11): 2561–2577 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1175>

一种基于双编码遗传算法的机动微波接力网组网方法

陈克斌¹, 鲁云军^{1†}, 韩梦瑶^{1,2}, 金乙乔¹

(1. 国防科技大学 信息通信学院, 武汉 430019; 2. 陆军勤务学院 国防经济系, 重庆 400030)

摘要: 针对机动微波接力网组网及优化需要, 提出一种基于双编码遗传算法 (DMGA) 的机动微波接力网组网方法. 以网络价值最大化为优化目标, 综合考虑节点价值、吸引系数、衰落概率等条件, 实现了对每个节点接力设备的智能分配. 通过研究网络价值与设备数的非线性关系, 引入最优配置点的概念, 为微波接力设备的编配数量提供量化依据. 在遗传算法中使用邻接矩阵和邻接表的双编码法, 其中邻接矩阵的优势是基因改变一定不会产生重复、自环链路, 邻接表的优势是基因改变不会影响链路的总数. 两种编码法在变异、交叉运算中交替运用, 使约束条件与染色体形态特征优势匹配, 避免了为满足约束进行的循环操作, 提高了运算效率. 仿真算例表明, 双编码算法与单编码相比, 计算耗时大大降低.

关键词: 遗传算法; 双编码; 微波接力网; 网络拓扑; 最优配置点; 邻接矩阵; 邻接表

中图分类号: TP302

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0347

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 陈克斌, 鲁云军, 韩梦瑶, 等. 一种基于双编码遗传算法的机动微波接力网组网方法 [J]. 控制与决策, 2020, 35 (12): 2915-2922.

Mobile microwave relay network construction method based on double coding genetic algorithm

CHEN Ke-bin¹, LU Yun-jun^{1†}, HAN Meng-yao^{1,2}, JIN Yi-qiao¹

(1. College of Information and Communication, National University of Defense Technology, Wuhan 430019, China; 2. Department of Defense Economics, Army Logistical University of PLA, Chongqing 400030, China)

Abstract: To facilitate the construction and optimization of mobile microwave relay network, a method of mobile microwave relay network construction based on the double coding genetic algorithm (DMGA) is proposed. Taking the maximization of network value as the optimization goal, considering the node value, attraction coefficient and fading probability, the intelligent distribution of relay device for each node is realized. By studying the non-linear relationship between the network value and the number of devices, the concept of optimal configuration points is introduced, which provides a quantitative basis for the allocation of microwave relay devices. In the genetic algorithm, the double coding strategy of the adjacency matrix and the adjacency list is used. The advantage of the adjacency matrix is that the change of gene will not produce repeated and self-loop links, and the advantage of the adjacency list is that the change of gene will not affect the total number of links. The two coding strategies are alternately used in mutation and cross operation, which makes the constraint condition and chromosome morphological characteristics match. This coding method avoids the iterative operation which is used to meet the constraints, and improves the operation efficiency. The simulation results show that compared with the single coding, the proposed double coding strategy reduces the computation time greatly.

Keywords: genetic algorithm; double-coding; microwave relay network; network topology; optimal configuration point; adjacency matrix; adjacency table

0 引言

现代战争对装备组织运用实时性、精确性、灵活性的要求越来越高, 如何利用工程化手段快速整合有限资源, 精确部署作战要素, 是决定战争胜利的重要

缘由. 微波通信是高带宽无线通信手段, 是军事机动无线通信的重要组成部分^[1]. 网络拓扑从根本上决定了网络性能, 合理、精确的拓扑结构是微波接力网性能发挥的首要保证. 目前, 借助计算机自动化手段, 针

收稿日期: 2019-03-24; 修回日期: 2019-05-29.

基金项目: 通信和指挥自动化装备军内科研重点项目 (TC-WHTY-Y-A-2014-XXX).

责任编辑: 林崇.

[†]通讯作者. E-mail: lu_yunjun@hotmail.com.

对机动微波接力网的拓扑优化研究还并不多见,利用拓扑优化结果对微波设备进行编配指导的研究更未见报道。

近年来,国内外学者对各类通信网络拓扑做了大量优化研究^[2-11]。智能优化算法是网络拓扑优化的主要工具,遗传算法^[3-6,10]、蚁群算法^[2]、禁忌算法^[3,7]、贪婪算法^[7]、模拟退火算法^[3,9]和人工鱼群算法^[9]均被选择和使用。从算法出现的频次来看,遗传算法使用的概率最高,主要原因如下:1)遗传算法具有可扩展性,适合于各种类型的通信网络;2)网络拓扑优化属于组合优化问题,遗传算法擅长解决此类问题;3)遗传算法最适宜的二进制编码方式能够很好地与网络的邻接矩阵相互转换^[3-6]。因此,遗传算法也是本文的首选。

文献[3-6,10]使用的遗传算法虽具有一定的普适性,但无法完全适用于微波接力网。首先,微波接力网作为军事通信网的一种,各节点和链路具有人为赋予的异质性^[12],多数算法^[3-6]并无这一要求。其次,多数学者^[2-4,6,10]在优化网络拓扑时,追求的是如何消耗最少的资源以获得最大的网络效益,即通常将网络中的链路数作为待优化量。而在微波接力网组网时,两个接力设备组成一条链路,在一次既定任务下,当装备编配完毕后,网络链路数通常是固定值,这将导致算法必须满足链路数一定、无重复、无自环等约束条件。常见的有约束优化问题处理方法是罚函数法^[13-15],但该方法将导致收敛能力下降,迭代次数增加。多次循环取值法虽不会降低收敛能力,但会大大增加时耗。

本文深入分析微波接力网节点和链路的生成原理,建立网络模型和优化目标。针对链路数一定、无重复、无自环等约束条件,给出一种邻接矩阵和邻接表交替使用的双编码遗传算法,将约束条件与两种编码的染色体形态特征优势进行匹配,显著提高了运算效率。进一步讨论接力设备数对网络价值的影响,为微波设备编配提供工程化依据。

1 问题描述与模型建立

1.1 问题描述

机动微波接力网的核心是微波接力设备,该设备用于完成微波信号发射、接收和中继,两台微波接力设备对准后建立视距连接,组成一条链路。微波接力网通常采用栅格状组网模式,网络中节点分为用户节点和干线节点,用户节点的位置由用户需求、地理环境等因素决定,干线节点位置由用户节点位置和地理环境决定。其中,地理环境极大限制了节点位置的选

择,一是视距连接要求节点间无遮挡,开设点必须考虑地理高度;二是受到多径衰落的影响,节点间应尽量避免横跨水面和光滑的地面,或采用高低天线法减少衰落,对节点位置和高度提出了新要求;三是考虑到雨雾衰减,节点位置气象条件应稳定。综上,在一次特定的任务中,终端节点位置已经确定,干线节点位置选择的自由度也较低。因此,本文仅考虑所有节点位置已确定的前提下,网络拓扑的优化。

在一次具体的通信保障任务中,由于作战任务的突发性,无法给任务部队实时调配任意数量的微波接力设备。假设某次任务中部队已有的设备数量为 M 个,考虑到网络效益的最大化,所有设备均开始使用,则其链路数为设备数 M 除以2的向上取整。对于具体的机动微波组网方案,网络链路数一定。

综上,微波接力网拓扑优化研究的是,在节点数、链路数一定的前提下,如何使网络价值最大化,其关键是有有限接力设备的分配问题。人工组网通常将微波接力设备集中于干线节点,但实际应用中,用户节点也能够当作干线节点使用。本文面向微波接力网组网,将解决3个问题:1)利用遗传算法,综合考虑多种因素,研究有限的微波接力设备在各个节点的最优分配问题,辅助人工组网;2)通过调整微波设备的总数,分别计算最优网络价值,研究增加接力设备对网络的贡献,指导接力设备的最优编配;3)结合微波接力网组网特点,改进传统遗传算法,提高网络优化效率,满足作战方案制定实时性的要求。

1.2 网络模型

为了解决上述问题,利用图论对微波接力网进行建模^[16-18]。将网络抽象成由具有异质点和链路组成的四元组 $G = (V, E, C^v, C^e)$,其中 V 是节点集, E 是链路集, C^v 是节点价值集, C^e 是链路价值集。具体解释如下:1)节点集 $V = (v_1, \dots, v_i, \dots, v_n)$ 表示接力网中各个通信节点的集合, n 表示节点的总数,在一次作战任务中, n 为定值。2)链路集 $E = (e_1, \dots, e_i, \dots, e_m)$ 表示接力网中两个节点间链路的集合, m 表示链路的总数。在微波接力网中,节点数 n 和连接数 m 通常不相等。由第1.1节的讨论可知,在一次作战任务中, m 为定值。另外,微波接力网组网时,一般不会在两个节点间同时开设多条重复链路,因为军事应用中,网络整体抗毁性比链路带宽更为重要,约定两节点间不得有重复边。3)节点价值集 $C^v = (c_1^v, \dots, c_i^v, \dots, c_n^v)$ 用于表示接力网中各个节点的价值,价值越大的节点,越期望其与更多的链路相连。 c_i^v 由作战任务内容决定,包括节点抗毁性需求、周围重

要节点数等因素. 需注意, c_i^v 与节点所在环境、设备能力无关, 所在环境由链路价值集体现, 设备能力在网络拓扑优化后分配, 优化前不予考虑. 4) 链路价值集 $C^e = (c_{ij}^e)_{n \times n}$ 用于表示接力网中两点间链路的价值, c_{ij}^e 可以表示为

$$c_{ij}^e = w_{ij} p_{ij}^{-1}. \quad (1)$$

其中: w_{ij} 是节点 i 与 j 间链路根据具体任务设定的吸引系数^[19], 表示节点间关系密切程度, 如上级指挥所通常与直属部队通信更加频繁, 此时两者间的 w_{ij} 应取较大值; p_{ij} 是节点 i 与 j 间链路微波连接的衰落概率, 衰落概率越大, 此连接被选中的概率越低, 因此在式(1)中取概率的倒数. 机动微波接力网常应用于陆地, 此时多径传播使单一的正弦信号变成了包络和相位受调制的窄带信号, 并产生瑞利型衰落, p_{ij} 可按微波瑞利衰落概率经验公式表示为

$$p_{ij} = KQ \frac{W}{W_0} f^B d_{ij}^c. \quad (2)$$

其中: K 为环境条件因子, Q 为地形条件因子, W_0 为无衰落时的接收功率, W 为有衰落时的接收功率, f 是发射频率, d_{ij} 为两个节点间的距离, B 和 c 为常数. 需要说明的是, 虽然 f 增大会增加带宽, 但军事通信中业务所需带宽低, 原则是保通为主, 高速为辅, 因此边价值取 f 倒数抓住了主要矛盾.

1.3 网络模型

根据上文的假设, 定义网络价值表达式为

$$F = \sum_{ij} e_{ij} \cdot c_{ij}^e \cdot \sqrt{c_i^v c_j^v}, \quad (3)$$

其中

$$\sum_{ij} e_{ij} = m. \quad (4)$$

式(3)的定义参考了文献[10]的网络成本、文献[18, 20]作战能力的定义方法, 将节点价值、链路价值和链路布尔值相乘获得每条链路的综合价值, 通过将网络中所有链路综合价值相加得到总体网络价值. 此外, 链路和节点价值相乘与相加相比, 有效避免了两者权重系数的引入^[10]. 因此, 本文组网目标是在节点数 n 一定的网络中, 利用遗传算法选择 m 条边 e_{ij} , 在保证全网连通的前提下, 使网络价值最大, 并根据生成的网络拓扑优化配置接力网中的设备、人力资源.

2 邻接矩阵表双编码遗传算法

遗传算法常见的编码方法包括二进制编码、实数编码, 近年来也出现了矩阵编码和树型编码等新的编码方法, 矩阵编码因在处理组合问题上的优势常被用于解决路径优化问题^[21]. 本文在矩阵编码基础上,

结合微波接力网特点, 给出一种基于邻接矩阵与邻接表的双编码遗传算法(DMGA).

2.1 邻接矩阵编码法

本文的个体染色体是微波接力网中一种可能的组网拓扑图 G . 邻接矩阵是在计算机中表示图的一种方法, 图 G 的邻接矩阵是一个 n 阶方阵, 邻接矩阵编码是矩阵编码的一种特例. 对于种群规模为 s 的第 k 代种群 P_k , 第 t 个个体的染色体 E_t 用下三角邻接矩阵定义为

$$E_t = \begin{bmatrix} e_{11}^t & \cdots & e_{1n}^t \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n1}^t & \cdots & e_{nn}^t \end{bmatrix}. \quad (5)$$

其中: n 是接力网节点数, 当 $i > j$ 且 i 与 j 间有链路时, 染色体基因 $e_{ij}^t = 1$. 另由第1.3节可知, $e_{ij}^t = 1$ 的基因共有 m 个.

2.2 邻接表编码法

邻接表是图在计算机中的另一种表示方法, 图 G 的邻接表定义为 m 行 1 列的矩阵 $B = (b_l)_{1 \times m}$, 其中 $l \in \{1, 2, \dots, m\}$, 且 $b_l = (i, j)$, i, j 是图 G 中的节点, $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$. B 中每一行代表一条由节点 i 和节点 j 组成的连边, 邻接表 B 也是边集的另一种表示方式. 在微波接力网中, 对种群规模为 s 的第 k 代种群 P_k , 第 t 个个体的染色体 E_t 的邻接表形式定义为

$$B_t = \begin{bmatrix} b_1^t \\ \vdots \\ b_m^t \end{bmatrix}. \quad (6)$$

其中: m 是接力网中微波链路数; 基因 b_l^t 为二元组, 且 $b_l^t = (i, j)$, $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$, n 是微波接力网中节点数. 按照第1.2节假设, 在接力网中, 某节点中的微波接力设备并不会与自身节点的其他接力设备连接, 因此有 $\forall b_l, i \neq j$. 另外, 网络中不能出现重复边, 即在某一染色体 B_t 中, 对 $\forall l_1, l_2 \in \{1, 2, \dots, m\}$ 且 $l_1 \neq l_2$, 有 $b_{l_1}^t \neq b_{l_2}^t$. 考虑到微波接力设备同时具有射频发信机和收信机, 图 G 是无向图, 则 $(i, j) = (j, i)$, 即数组 B_t 中的 b_l^t 无方向性. 因此, $b_{l_1}^t \neq b_{l_2}^t$ 的意义为 $b_{l_1}^t$ 和 $b_{l_2}^t$ 中元素值不能全相同, 与元素顺序无关.

2.3 双编码染色体特点与使用

根据2.1节和2.2节的讨论, 将下三角邻接矩阵编码法和邻接表编码法的特点总结于表1.

由表1可知, 下三角邻接矩阵 E_t 行、列数等于微波接力网节点数 n , 邻接表矩阵 B_t 行数等于接力网中链路数 m . 在遗传算法中, 选择、交叉、变异算子不会改变矩阵的行列数, 因此, E_t 适用于限制节点数不变的算子, B_t 适用于限制连边数不变的算子.

表1 两种编码方式的特点

	行数意义	列数意义	元素形态	元素数值意义	元素位置	约束条件
邻接矩阵 E_t	节点数 n	节点数 n	布尔数 e_{ij}^t	边是否存在	边的端点 i, j	$\sum_{i,j} e_{ij}^t = m$
邻接表 B_t	连边数 m	始终为1	二元数 b_i^t	边的端点 i, j	无意义	$b_{i_1}^t \neq b_{i_2}^t$

选择运算,在对种群 P_k 中个体进行选择时,即根据式(3)算出目标函数值,再按一定策略选出规模为 s 的个体. 由于选择算子不会改变个体的元素值,即新的种群个体仍然满足 E_t 和 B_t 的约束条件,使用 E_t 和 B_t 均可. 式(3)的定义更适合利用 E_t 中元素 e_{ij}^t 进行计算,因此,选择算子使用染色体下三角邻接矩阵形式.

交叉运算,即在种群 P_k 中选出个体 A_t 与 A_{t+1} 进行部分基因交换. 第1类交叉策略^[22]是在染色体中选择1个或多个位置点,两个父染色体以这些位置点为参照,交换位置点前后的染色体,如矩阵的行、列、点交叉法. 交叉结果是, A_t 中的真子集 $A_{t,sub}$ 与 A_{t+1} 中的真子集 $A_{t+1,sub}$ 互换基因元素,其中 $A_{t,sub}$ 与 $A_{t+1,sub}$ 中元素数相同. 若使用下三角邻接矩阵 E_t 进行上述操作,则由于真子集选择的随机性,无法保证 $\sum_{i,j} e_{ij}^{t,sub} = \sum_{i,j} e_{ij}^{t+1,sub}$,交叉后染色体大概率将无法满满足表1中 E_t 的约束条件,即交叉后微波接力网拓扑 G 中的链路数将发生改变. 第2类策略将2个父染色体 A_t 、 A_{t+1} 中的所有数据进行提取,按照一定的策略进行平均分配,生成新的染色体,如交替位置交叉法. 但 E_t 中,仅存在1和0两种元素,使用该策略不论父代如何,提取的数据均是 $2m$ 个1, $2(n^2 - m)$ 个0,数据再分配时已完全失去了父代的特征,丧失了遗传的意义. 利用邻接表进行交叉操作,链路数 m 是矩阵的行数,因此交叉不会改变图 G 的链路数. 此外,不同 B_t 中元素 b_i^t 差异较大,使用交替位置交叉法仍能体现出父代特征,且交替交叉法本身的运算规则将使子代满足邻接表约束条件 $b_{i_1}^t \neq b_{i_2}^t$. 因此,染色体邻接表编码法应用交叉算子,避免了使用多次迭代满足约束条件,提高了算法效率.

变异运算,种群 P_k 中个体均是矩阵,矩阵变异算子有两种策略,第1种在个体 A_t 中,随机选择其中的某些元素,在定义域范围内,改变元素的值;第2种是改变个体 A_t 中元素在矩阵中的位置. 将第1种策略应用于 E_t 或 B_t 两种编码法均可能导致新个体不满足微波接力网约束条件. 如改变邻接表 B_t 中元素值,则可能导致重复边、自环边的存在;改变下三角邻接矩阵 E_t 中元素值,会导致 $\sum_{i,j} e_{ij}^t \neq m$. 利用第2种

变异策略时, B_t 中元素的位置无实际意义, B_t 并不适用. 而 E_t 中元素的位置描述了边的性质(见表1),只需移动矩阵中1的位置,即可实现变异,且由于元素值无变化,新个体必满足约束条件 $\sum_{i,j} e_{ij}^t = m$. 但须注意,1的移动必须在 E_t 的下三角矩阵中进行. 因此,染色体邻接矩阵编码法变异操作能够巧妙避开微波接力网的约束条件. 结合上述讨论,图1进一步解释了两种编码法在变异、交叉算子中的特点.

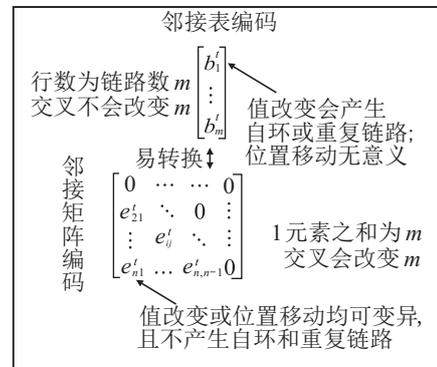


图1 两种编码方式在交叉、变异算子中的特点

2.4 DMGA 流程实现

综上,DMGA基本步骤如下.

step 1: 初始种群中个体采用下三角邻接矩阵编码方式 E_t , E_t 随机生成,并利用式(7)判断连通性

$$(I + E_t + E_t^2 + \dots + E_t^{n-1})_{ij} > 0 \quad (7)$$

淘汰非连通个体,保留连通个体,直到生成种群规模为 s 的初始种群 P_1 ;

step 2: 利用锦标赛算子对初始种群 P_1 进行选择运算,生成选择后的种群 P_1^s , P_1^s 种群规模仍为 s ,且存在重复个体. 锦标赛算子对不同个体差异敏感度更高,处理网络拓扑优化问题时,求解精度和求解速度整体优于轮盘赌选择算子;

step 3: 将 P_1^s 中染色体转换为邻接表形式,将 P_1^s 中所有个体两两配对,以概率 p_c 使用交替位置交叉法对一对个体交叉运算,再将邻接表染色体转换为邻接矩阵形式,生成交叉后的种群 P_1^{sc} ;

step 4: 针对 P_1^{sc} 中的个体,保持其染色体邻接矩阵形式,对每个个体以概率 p_c 对调下三角矩阵位置范围内某个1与其他点的位置,并利用式(7)判断其连通性,若不连通则重新变异,直到生成变异后群

体 P_1^{scm}, P_1^{scm} 即为第2代种群 P_2 ;

step 5: 若不满足迭代次数,则种群 P_2 重新进行 step 2.

算法需要对种群中所有个体进行运算,与种群规模 s 的时间复杂度为 $O(s)$;选择算子与网络节点数 n 的时间复杂度为 $O(n^2)$;变异算子随机取点,与链路数 m 和节点数 n 无关,时间复杂度为 $O(1)$;交叉算子与 n 无关,与链路数 m 时间复杂度为 $O(m)$.

3 算例仿真与分析

3.1 组网实现及拓扑分析

以某微波接力网组网方案为例,对其进行仿真分析,实验环境:操作系统为 Windows 7,处理器 Inter(R) Core(TM) i5-8300 CPU @2.30 GHz,内存 8 GB. 假设开设微波接力通信的节点共有 12 个,可分配的微波接力设备 36 台(可组成 18 条链路). 同时假设各个节点所在区域微波衰落瑞利概率公式中有 $KQ = 10^{-9}, B = 1.2, c = 3.5, f$ 取 15 GHz, $W = W_0$, 各节点间距离 $d_{ij} \in D, D$ 为 12×12 的距离方阵. 根据

节点坐标对节点按顺序编号,将节点的价值分为 4 档,分别是极其重要、很重要、重要、一般,分别用 1 到 4 的数字表示,即 $c_i^v \in (1, 2, 3, 4)$,节点信息见表 2,其中坐标单位间隔为 km. 遗传算法交叉概率取 0.6,变异概率取 0.2.

表 2 通信节点信息

节点序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
横坐标	17	26	11	18	23	20	14	16	25	12	23	9
纵坐标	41	39	35	34	34	30	30	29	28	25	23	29
节点价值	4	1	1	2	3	4	2	3	1	4	2	1

为了验证某一参数改变对组网的影响,通过改变吸引系数对算法进行了 3 组实验. 第 1 组和第 2 组假设网络中仅 1 号与 7 号、3 号与 10 号节点吸引系数较大,其中,第 1 组有 $w_{1,7}, w_{3,10} = 2$,其他 $\forall w_{ij} = 1$;第 2 组 $w_{1,7}, w_{3,10} = 5$,其他 $\forall w_{ij} = 1$;第 3 组实验有 5 对节点吸引系数较大,且这 5 对节点间距离较远,它们是 $w_{1,2}, w_{1,7}, w_{3,10}, w_{3,12}, w_{6,11} = 5$,其他 $\forall w_{ij} = 1$. 3 组实验每组运行 50 次,取网络价值最大的 3 次结果,网络拓扑见图 2.

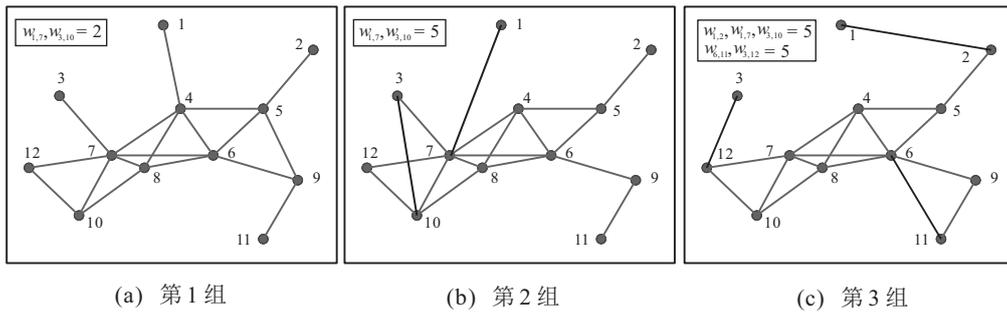


图 2 不同吸引系数下的微波接力网拓扑

由图 2(a) 可以看出,该网络拓扑具有栅格网特点. 处在网络中心的节点具有更多的连接,因为中心节点与其他节点距离更近,组成的微波链路更加稳定,这符合人们直观预期. 整个网络呈栅格网拓扑结构,具有较强的抗毁性. 根据图 2,各个节点的度即为所需微波接力设备的数量.

算法对整个网络拓扑处理具有全局性,会选择全局利益的最大化,舍弃一定的局部利益. 对节点的处理仍然如此,10 号节点虽然位于网络边缘,但由于该节点的价值处于最高级,有 3 条边与该节点连接. 1 号节点有相同的价值,也地处网络边缘,但由于与其他节点距离较远,考虑到全局利益,仅有 1 条边与其相连.

第 1 组实验中,虽然将顶点 1 和 7、3 和 10 之间的吸引系数 w_{ij} 增大,但值仅为其他 w_{ij} 的 2 倍,难以支持优化算法对其进行选择. 在第 2 组实验中,将它们

系数值增加为其他边的 5 倍,两条链路出现在了网络中(图 2(b)). 为了进一步验证算法对全局网络价值和局部价值的考虑,在第 3 组实验中,将距离较远的 5 对节点 w_{ij} 增大,增大为其余 w_{ij} 的 5 倍. 然而,算法并没有完全选择这 5 对节点间的链路,经过顶点 1 和 7、3 和 10 的链路并没有出现在最终结果中,这是因为若完全选择全部 5 条链路,会导致更加重要的链路被移除,拓扑变化与参数变化呈现出了非线性关系. 此外,对比 3 组实验结果可以看出,强行增加吸引系数可能导致网络抗毁性变差,在图 2(b) 中,若 6 号节点被毁,则 9 号和 11 号节点与网络失去联系;图 2(c) 中,5 号和 6 号节点均出现了此类情况.

3.2 组网实现及拓扑分析

由式 (3) 可知,当微波接力设备数量 e_{ij} 增加时,网络价值也会增加. 但由于接力设备资源的有限性,必须研究不同编配所带来的效益. 下面利用本算法,

按照第1组实验的参数,分别对比微波接力设备为30台、40台、50台和60台的情况.每种情况运行20次,取网络价值(适应值)最大的1次,迭代次数与网络价值的关系见图3(a).可以看出,微波接力设备从30台增加到40台的网络价值增加最为明显.微波接力设备从40台增加到50台时,网络价值增量为30台到40台增量的45.18%;微波接力设备从50台增加到60台

时,网络价值增量为30台到40台增量的30.03%.因此,在任务一定的情况下,当微波接力设备达到一定数量后,继续增加其数量并不能得到高效的回报,多余的微波接力设备和保障人员更适宜作为预备力量.另外,由图3(a)也可以看出,本算法在微波接力设备数量较少时优化效果更加明显,这是因为初始化链路数越多,包含较优链路的概率越大.

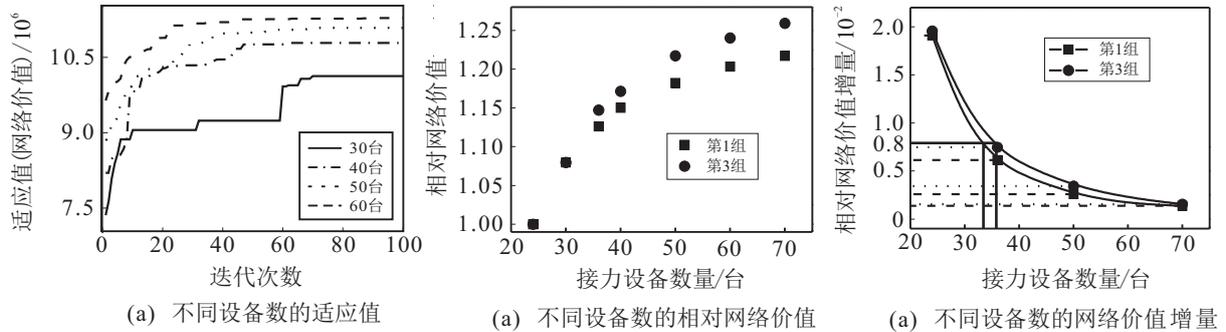


图3 设备数量与网络价值的关

以24台接力设备所得网络价值为基准,其他网络价值取该基准的相对值,图3(b)更清晰地展示了接力设备数量与相对网络价值的非线性关系.图3(b)中方块和圆点分别代表第1组和第3组实验的数据.每个点的值是在不同设备数条件下,多次运行本算法后得到的网络价值最大值.可以看出,随着接力设备数的增加,网络价值逐渐增大,但增速先快后慢,说明持续增加接力设备的数量所带来的效益逐渐降低.

为了确定接力设备最佳配置点,利用 Matlab 的 cftool 对图3(b)中的散点采用插值逼近的方式进行拟合,并对两条曲线求导,斜率如图3(c)所示.图3(c)中的纵坐标代表每增加一台接力设备,相对网络价值的增加量,可以看出,两者网络价值的增量随着微波接力设备数量的增加下降明显.在接力设备数量较少时,两组实验相对网络价值增速接近,这是因为初始阶段两者选择了相同的链路.当接力设备数量不断增多时,第3组实验中独有的权值较大的链路被选入较优解中,网络价值高增速额外保持了一段时间.当接力设备数量进一步增多时,两者逐渐接近,因为在接力设备数量达到一定程度后,两组实验可选的链路几乎相同.另外,假设要求每增加一台接力设备所增加的相对网络价值大于0.008,否则增加设备不经济,并以此作为最优配置点.可以看出,第1组所需的接力机数约为34台,第3组所需的接力机数约为36台.第3组所需最优设备数量大于第1组,这是因为第3组增加了额外的链路需求,理应消耗更多的资源,这

符合人们的一般认知.

3.3 双编码算法效率分析

按照第1组实验的参数,添加对照算法,验证 DMGA 的先进性.对照组采用文献[23]中的二进制单编码 SGA 算法.在不同微波接力设备数下运行两种算法,每种情况运行50次,图4分别对比了两种算法所得网络价值的最大值和平均值,最大值表明两种算法的拓扑优化能力相同.两种算法的平均值与最大值相比均有所下降,是由遗传算法固有的早熟缺陷导致的. DMGA 交叉算子为交替位置交叉法,该方法将两个父染色体中基因混合后平均分配,属于破坏性较强的交叉算子^[24],与 SGA 的单点交叉相比,相对易于防止算法早熟. DMGA 平均值在最差点(36台设备)处,值为最大值的98.1%,可见其早熟收敛率并不高.在对比平均值时,DMGA 等于或稍优于 SGA,仅在50台设备处低于 SGA,证明 DMGA 算法与 SGA 相比并不易发生早熟.

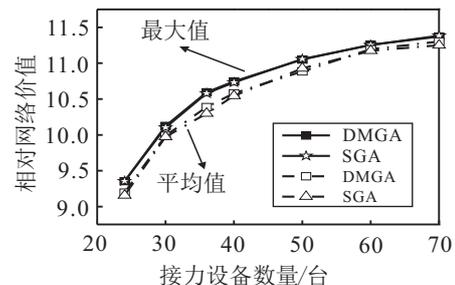


图4 两种算法所得网络价值的最大值与平均值

图5是两种算法的时耗.在3.2节所述最优配置点处,DMGA时耗约为8s,SGA耗时约为36s,时耗缩

短77.8%。SGA为了保证染色体交叉后链路数一定,需采用多次循环取值法对随机选择的交叉位置进行判断,以保证父染色体交叉后1的数量恒定,循环是时耗的主要原因。DMGA在交叉运算时,由于使用邻接表编码代替了邻接矩阵,避免了循环,大幅降低了时耗。虽然单次运行节省时间仅为28s,但为了避免得到局部最优解,算法通常需多次运行^[10,13]取最大值,若运行50次,则节约时间为23.3min。

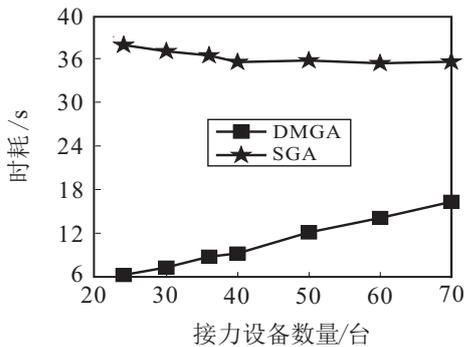


图5 两种算法的时耗

图5中,接力设备数增多,DMGA时耗上升,因为邻接表长度增加,使交替位置交叉法需处理更多的元素。接力设备数增加,SGA时耗反而减少,这是因为随着父染色体中1的数量增加,1和0数量更加均衡,循

环更易找到合适的交叉位置。但实际应用中,设备数量一般在最优分配点附近,且过多的设备将导致拓扑优化失去意义。即便设备在70台时,DMGA时耗仍为SGA的45.8%。因此,DMGA在处理链路数一定、无重复、无自环等众多约束条件的网络优化问题时具有明显的时耗优势。

为了验证DMGA的普遍适用性,将微波接力网组网问题抽象为一般的有约束拓扑优化问题进行验证。此类问题的特征是节点数和连边数均一定,且网络中无自环和重复链路。如表3所示,实验中节点数 n 分为3种情况,位置随机生成,对于每种节点数,连边数 m 取3种情况,算法运行结果均以SGA为基准进行对比。可以看到,DMGA算法时耗明显优于SGA,当节点数为10,连边数为20时,DMGA时耗仅为SGA的15.2%。随着节点数的增多,DMGA优势逐渐下降,但军事类通信问题由于作战地域和规模有限,30个节点已能够很好地满足优化的需要^[25]。此外,许多民用通信网络优化问题,节点数也在30个以下^[5-6,10]。表3中的适应度为每一种情况运行50次后的平均值,DMGA在多种情况下等于或稍优于SGA。在10个节点时,两者优化能力相同,这是因为此时问题解集数目较少,两种算法易得出相同解。

表3 不同节点和连边数条件下两种算法的对比

算法	$n = 10$			$n = 20$			$n = 30$		
	12	18	20	25	30	40	35	40	60
时耗DMGA/SGA	0.183	0.185	0.152	0.323	0.377	0.510	0.616	0.567	0.686
适应值DMGA/SGA	1	1	1	1.006	1.008	0.999	1.004	0.985	1.021

4 结论

本文针对机动微波接力网,提出了一种基于双编码遗传算法的网络拓扑优化方法,生成的网络拓扑呈栅格结构,符合人工组网要求。同时,在不同参数条件下运行算法,网络价值与微波接力设备投入量呈现非线性关系。在此基础上,提出了最优配置点的概念,给微波接力设备最优编配提供了科学的理论依据。在遗传算法中,提出了邻接矩阵和邻接表两种编码方式交替使用的策略,两种编码方式各自具有稳恒的形态特征,这些特征不受各类算子影响,将网络约束条件与此特征匹配,提高了算法效率,在最优配置点处时耗与单编码^[23]相比下降了77.8%。该编码思想可适用于其他矩阵编码的优化算法,特别是具有点边一定、无重复、无自环等众多约束条件的优化问题^[7-9]。下一步将增加抗毁性分析,进一步完善网络模型和组网算法。

参考文献(References)

- [1] 周亮, 孙明峰, 彭章友, 等. 美军战术互联网构成及其战术模拟方法研究[J]. 通信技术, 2015, 48(10): 1157-1161.
(Zhou L, Sun M F, Peng Z Y, et al. Architecture and simulation of US military tactical internet[J]. Communications Technology, 2015, 48(10): 1157-1161.)
- [2] Watcharasitthiwat K, Wardkein P. Reliability optimization of topology communication network design using an improved ant colony optimization[J]. Computers & Electrical Engineering, 2009, 35(5): 730-747.
- [3] Mostafa A E B. Topological network design: A survey[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2009, 32(3): 501-509.
- [4] Morais R M, Pavan C, Pinto A N, et al. Genetic algorithm for the topological design of survivable optical transport networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(1): 17-26.
- [5] Jahromi A E, Rad Z B. Optimal topological design

- of power communication networks using genetic algorithm[J]. *Scientia Iranica*, 2013, 20(3): 945-957.
- [6] Dang Z, Zhang Y. Optimization of communication network topology for navigation sharing among distributed satellites[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(1): 143-152.
- [7] Liu Y, Yang C, Tang W K, et al. Optimal topological design for distributed estimation over sensor networks[J]. *Information Sciences*, 2014, 254(1): 83-97.
- [8] Nahir A, Orda A, Freund A, et al. Topology design of communication networks: A game-theoretic perspective[J]. *IEEE ACM Transactions on Networking*, 2014, 22(2): 405-414.
- [9] Chen Z, Wu J, Rong Z, et al. Optimal topologies for maximizing network transmission capacity[J]. *Physica A-statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 495(1): 191-201.
- [10] 石悦, 邱雪松, 郭少勇, 等. 基于改进遗传算法的电力光传输网规划方法[J]. *通信学报*, 2016, 37(1): 116-122.
(Shi Y, Qiu X S, Guo S Y, et al. Optimal planning of optical transmission network using improved genetic algorithm[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(1): 116-122.)
- [11] Wang C L, Huang N, Bai Y N, et al. A method of network topology optimization design considering application process characteristic[J]. *Modern Physics Letters B*, 2018, 32(7): 1850091.
- [12] 石福丽, 朱一凡. 基于超网络理论的军事通信网络复杂性度量方法[J]. *通信学报*, 2011, 32(12): 51-59.
(Shi F L, Zhu Y F. Measuring the complexity of military communication network based on supernetwork theory[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(12): 51-59.)
- [13] 王吉权, 程志文, 张攀利, 等. 求解有约束优化问题的实数遗传算法改进研究[J]. *控制与决策*, 2019, 34(5): 937-946.
(Wang J Q, Cheng Z W, Zhang P L, et al. Research on improvement of real-coded genetic algorithm for solving constrained optimization problems[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(5): 937-946.)
- [14] Liu F, Sun Y, Wang G G, et al. An artificial bee colony algorithm based on dynamic penalty and Lévy flight for constrained optimization problems[J]. *Arabian Journal for Science & Engineering*, 2018, 43(12): 7189-7208.
- [15] Xu X, Dang C, Chan F T, et al. On smoothing I1 exact penalty function for constrained optimization problems[J]. *Numerical Functional Analysis and Optimization*, 2019, 40(1): 1-18.
- [16] 徐建国, 李孟军, 姜江, 等. 预警作战体系超网络建模及结构分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(5): 1043-1049.
(Xu J G, Li M J, Jiang J, et al. Supernetwork modeling and structure analyzing for warning combat system[J]. *Systems Engineering and Electronic*, 2018, 40(5): 1043-1049.)
- [17] Li J C, Ge B F, Zhao D L, et al. Meta-path-based weapon-target recommendation in heterogeneous combat network[J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(4): 4433-4441.
- [18] Li J C, Jiang J, Yang K W, et al. Research on functional robustness of heterogeneous combat networks[J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(2): 1487-1495.
- [19] 鲁云军, 蔡福利, 周明. 一种面向训练的通信网系背景业务量建模方法[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(3): 552-558.
(Lu Y J, Cai F L, Zhou M. Modeling method of communication networks background traffic for counter-command simulation training[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(3): 552-558.)
- [20] Li J C, Zhao D L, Jiang J, et al. Capability oriented equipment contribution analysis in temporal combat networks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, DOI:10.1109/TSMC.2018.2882782.
- [21] 杜永贵, 陈鑫. 矩阵编码的遗传算法[J]. *太原理工大学学报*, 2012, 43(2): 111-113.
(Du Y G, Chen X. Matrix-coded genetic algorithm[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2012, 43(2): 111-113.)
- [22] Kaya M. The effects of two new crossover operators on genetic algorithm performance[J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(1): 881-890.
- [23] 杨新武, 杨丽军. 基于交叉模型的改进遗传算法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(10): 1837-1844.
(Yang X W, Yang L J. An improved genetic algorithm based on crossover model[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(10): 1837-1844.)
- [24] Pandey H M, Chaudhary A, Mehrotra D. A comparative review of approaches to prevent premature convergence in GA[J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 24: 1047-1077.
- [25] 王国民, 丁兆忠, 夏兴宇. 美军战术互联网模拟与运用方法研究[J]. *通信技术*, 2013, 46(6): 69-71.
(Wang G M, Ding Z Z, Xia X Y. Simulation and implementation of U.S. tactical internet[J]. *Communications Technology*, 2013, 46(6): 69-71.)

作者简介

陈克斌(1987—), 男, 讲师, 博士生, 从事军事运筹等研究, E-mail: chenkebin17@nudt.edu.cn;

鲁云军(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 从事指挥信息系统、作战仿真与模拟训练等研究, E-mail: lu_yunjun@hotmail.com;

韩梦瑶(1989—), 女, 讲师, 博士生, 从事军事运筹等研究, E-mail: 854128547@qq.com;

金乙乔(1989—), 男, 助教, 硕士生, 从事指挥信息系统的研究, E-mail: 799380276@qq.com.

(责任编辑: 孙艺红)