

TTE 网络通信链路自动规划方法研究*

郑小鹏¹, 张涛², 王小辉¹

(1. 中国运载火箭技术研究院研究发展部, 北京 100076; 2. 西北工业大学 软件学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 针对 TTE 网络中存在的消息调度以及链路规划依赖于手工配置、难以负担庞大的网络结构等问题, 对 TTE 网络的通信链路规划方法进行了仿真研究, 构建了链路规划模型, 通过头脑风暴算法这种新型的启发式算法来寻找问题的解。通过实验仿真对比, 验证了头脑风暴优化算法的有效性以及在规划后期有比遗传算法更加稳定的执行效果, 提升了网络传输效率, 有很广泛的应用前景。

关键词: 时间触发以太网; 负载均衡; 启发式算法; 遗传算法; 头脑风暴优化算法

中图分类号: TN915.07; TP393

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222735

中文引用格式: 郑小鹏, 张涛, 王小辉. TTE 网络通信链路自动规划方法研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(11): 94-98, 103.

英文引用格式: Zheng Xiaopeng, Zhang Tao, Wang Xiaohui. Research on automatic planning method of TTE network communication link[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(11): 94-98, 103.

Research on automatic planning method of TTE network communication link

Zheng Xiaopeng¹, Zhang Tao², Wang Xiaohui¹

(1. R&D Department China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

2. School of Software, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To address the problems of message scheduling and link planning in TTE networks, which rely on manual configuration and are difficult to afford large network structures, a simulation study of the communication link planning method for TTE networks is conducted, and a link planning model is constructed to find the solution to the problem by a new heuristic algorithm, the brainstorming algorithm. Through experimental simulation comparison, the effectiveness of the brainstorming optimization algorithm and its more stable execution than genetic algorithm in the late planning stage are verified, which improves the network transmission efficiency and has a very wide application prospect.

Key words: time triggered Ethernet; load balancing; heuristic algorithm; genetic algorithm; brainstorming algorithm

0 引言

在航空航天、武器装备等领域, 由于通信数据量呈现逐渐增大的趋势, 传统的低传输总线已无法满足现有高端领域的发展需求。时间触发以太网在保留传统以太网优良特性的基础上, 同时确保了实时传输业务的确定性和可靠性。

TTE 网络中的调度表用于对时间触发业务进行提前调度规划, 以保证时间确定性业务的高效无误传输。然而对于消息调度中的调度表生成, 目前缺少自动化部署方案的产生, 仍处于比较落后的人工手动配置阶段; 同时, 在对实时性消息的链路规划方面也缺少相应的自动化规划方法, 消息调度和链路规划过程效率低下。因此, 在时间触发消息的调度中, 如何设计更为可行有效的自动化部署方案来代替传统手工配置, 是 TTE 网络当

下的研究热点之一。

在国外, Long 等^[1]提出了一种动态路径规划方案, 该方案可以动态实时调整消息传输过程中的路由转发路径。文献[2]提出的多路径传输方案可以给每条消息计算近似最优的传输路径; 全局负载均衡(Global Load Balancing, GLB)^[3] 算法可以选择每条消息传输的最优路径, 它的性能优于动态负载均衡(Dynamic Load Balancing, DLB)^[4] 算法。同时, 文献[5]提出的算法也可以为新消息分配最优传输路径, 该算法结合了传统多路径传输方案和速率适配机制。文献[6]围绕多跳时间触发以太网的调度优化机制与算法进行了深入研究, 提出一种适用于时间触发以太网的可调节时隙的高效调度算法, 并通过时间触发以太网网络模型进行演示和验证, 提高网络带宽资源利用率。除此以外, 有很多启发式算法也用于负载均衡的研究。文献[7]提出了一种改进遗传算法来解决多协议标签交换网络(Multi-Protocol Label Switch, MPLS)

* 基金项目: 航空科学基金(2015ZD53055, 20185853038, 201907053004); 国家自然科学基金(61901388)

的负载均衡问题。文献[8]提出了一种基于负载均衡的时间触发以太网消息调度表生成方法,为改善机载网络的消息调度性能提供了一种可行方案。

由以上分析可以看出,在负载均衡领域,面对不同的需求以及应用场景的复杂化,对负载均衡的需求也越来越多,要求也越来越高。有些传统算法无法解决的问题,启发式算法也被加入用于负载均衡的应用,有非常高的应用价值,很好地解决了负载均衡问题。

本文使用头脑风暴优化算法对 TTE 网络的通信链路规划算法进行了设计,对算法的理论基础和实现流程做了详细阐述,并仿真实现了基于头脑风暴优化算法的 TTE 网络通信链路自动规划方法。在负载均衡研究方向,本文主要研究基于物理链路的负载均衡,即对于网络中的链路传输,保证各个链路可以达到一种均衡的状态,避免出现有些链路过载而有些链路轻载的情况。

1 TTE 网络链路规划模型

对于 TTE 网络而言,链路规划实际上就是在通信任务确定的情况下对所有通信任务的路径进行规划。

1.1 TTE 网络拓扑结构

本文采用环形网络拓扑架构。交换机之间互相连接形成环状结构,该结构不仅可以承载不同业务信息,且具有很好的容错性,如图 1 所示。

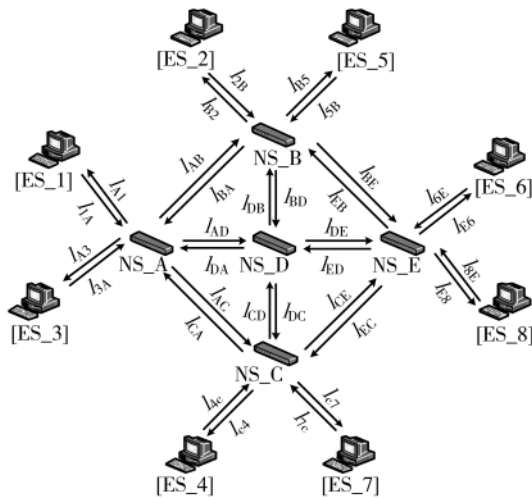


图 1 TTE 网络架构拓扑

本文将图 1 的网络拓扑为例,进行链路规划算法的设计,运用图论知识,将图 1 建模为无向图 $\text{Graph}=(V, E)$ 。图 1 中 TTE 网络拓扑结构中包含了 3 种物理设备类型,分别是 ES、NS 和 Link,用 NP 表示网络中所有的 ES 和 NS 集合, $\text{NP}=(\text{ES}, \text{NS})=\{p_1, p_2, \dots, p_{np}\}$, np 为节点数量。物理链路 Link 的集合定义为 L ,例如节点 p_i 到 p_j 之间的链路 $l(l \in L)$ 可以表示为 $l_{ij}, i \neq j$ 。图 2 为抽象后所形成的拓扑结构。

采用邻接矩阵 $C=(c_{ij})_{np \times np}$ 定义节点之间的连通关系, c_{ij} 表示为:

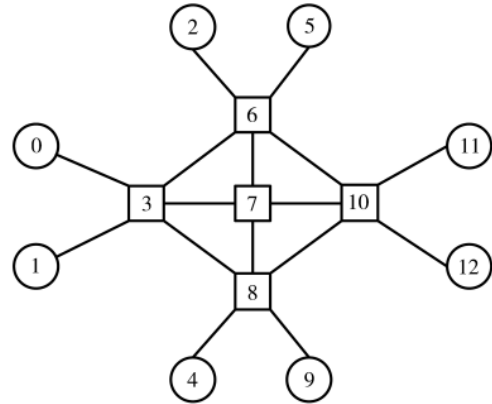


图 2 抽象后的网络拓扑

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 & l_{ij} \in L \\ 0 & l_{ij} \notin L \end{cases} \quad (1)$$

其中, $c_{ij}=1$ 表示 p_i 到 p_j 之间有连接, $c_{ij}=0$ 则表示 p_i 到 p_j 之间无连接。

定义通信流传输路径为 Path_{ij} :

$$\text{Path}_{ij} = l_{i1} + l_{s23} + \dots + l_{sqj} \quad (2)$$

式(2)用一个有序的链路序列代表通信流传输路径, i 表示通信流起始端点, j 表示通信流的接收端点。定义虚拟链路(Virtual Link, VL)为拓扑中所有通信流路径的并集,公式如式(3)所示:

$$\text{VL} = \cup \text{Path}_{ij} \quad (3)$$

1.2 约束条件

在给定网路拓扑和通信任务情况下,为了衡量整个网络的负载情况,避免网络拥塞,参考文献[9]做出如下定义:

$$\text{Load}(k) = \sum_{i=1}^{M_k} \frac{L_i^k}{T_i^k} \quad (4)$$

式中, L_i^k 表示第 k 条链路上传输的消息 i 的帧长, T_i^k 表示第 k 条链路消息 i 的周期, $\frac{L_i^k}{T_i^k}$ 可以描述单条消息的

负载情况。在链路中, M_k 是第 k 条链路上所经过的消息数量总和, $\text{Load}(k)$ 表示第 k 条链路上传输的所有消息的负载总和。

$$\text{Load} = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^{M_k} \frac{L_i^k}{T_i^k} \quad (5)$$

式中, n 是网络拓扑中的链路数量总和, Load 计算的是网路上所有链路的负载总和。

$$\varphi = \frac{\text{Load}}{n} \quad (6)$$

$$D_k = \left(\sum_{i=1}^{M_k} \frac{L_i^k}{T_i^k} - \varphi \right)^2 \quad (7)$$

式中, 参数 φ 为拓扑中所有链路的消息负载平均值, 计

算方式为拓扑总负载除以总的链路数量。 D_k 表示第 k 条链路上所有消息负载的均方差。

$$D(x) = \sum_{k=1}^n \left(\sum_{i=1}^{M_k} \frac{L_i^k}{T_i^k} - \varphi \right)^2 \quad (8)$$

式(8)计算了网络上的所有链路的方差,即是整个网络拓扑的方差。在目标函数的选择中,将以式(8)中的均方差来表征网络中负载均衡程度。

在每一次算法执行之后,对每一个规划好的链路都乘以当前拓扑中的消息总跳数,用以衡量当前规划结果的最短路径约束:

$$R(x) = \sum_{k=1}^n M_k \quad (9)$$

式中,解集 $x=(x^1, x^1, \dots, x^n)$, 表示规划好的每一条链路,其中 x^i 表示第 i 条链路上规划的消息。

1.3 目标函数

在算法执行时需要使用适应度函数来描述当前规划结果的优劣,适应度高的个体更有可能被保留下来,继续后续的迭代。适应度函数的描述方式需要提前根据应用场景进行计算,本节将推导出本文使用的目标函数,用于适应度函数的计算。

本文约束下负载均衡的描述方程表示为 $D(x)$, 最短路径的描述方程为 $R(x)$ 。此时,目标函数的约束方程为:

$$F(x) = D(x) \cdot R(x) \quad (10)$$

由于网络拓扑中每条链路的带宽必须符合相应的最大限度带宽要求,因此,惩罚函数是在进行链路规划时的链路带宽约束条件,可以将链路最大带宽限制的最优化问题转化为带有惩罚函数的无约束限制问题,以便于问题的求解,同时惩罚函数可以对非可行解进行相应处理。具体计算公式如下:

$$G(x) = F(x) + H \left| \sum_{k=1}^n \max(0, bw_k - bw_{\max k}) \right| \quad (11)$$

式中, bw_k 、 $bw_{\max k}$ 用来描述带宽,前者是第 k 条链路上目前被占用的带宽,后者是链路最大带宽;参数 H 是一个无限大的正整数。当满足拓扑中链路带宽的约束限制条件时,则有 $bw_k - bw_{\max k} \leq 0$ 恒成立,此时的目标函数为 $G(x) = F(x) + H \times 0$, 此即为可行解的目标函数值。

2 基于头脑风暴优化算法的 TTE 链路规划

2.1 种群初始化

假设 TTE 链路中通信流集合为 Q , 其中一个通信流的所有可行路径集合为 Q_i , 它的最大路径编号为 N_{q_i} 。例如在图 2 所示的网络拓扑中选出 3 条通信流, 定义为 Message1、Message2、Message3, 它们的起始节点分别是 0、1、2, 终止节点分别是 5、4、9, 可行路径及相关信息如表 1 所示。此时, Q 即为 3 条通信流所有的可行路径集合, Q_i 是 Message i 的所有可行路径集合, N_{q_i} 是 Message i 的所有可行路径数目。

表 1 编码示例

通信流	起始节点	终止节点	可行路径	编号	权重
Message1	0	5	0-3-6-5(4);	1	5
			0-3-8-10-7-6-5(7);	2	1
		
Message2	1	4	1-3-6-7-8-4(6);	1	3
			1-3-7-8-4(5);	2	8
		
Message3	2	9	2-6-3-7-8-9;	1	6
			2-6-7-10-8-9;	2	4
		
...

表 1 中分别示例了每条消息的两条可行路径以及各个路径的权重因子。可行路径是通过深度优先搜索得到的可行路由, 每一条通信流含有多条路径可以选择, 数字 1、2... 代表了当前路径的编号。因此对于每一条消息, 可以将每一个路径编码为自然数 1、2、3..., 那么经过编码后的个体可以是 111、121、222 等。

2.2 划分聚类

在初始种群产生之后, 需要进行划分聚类, 将产生的 N 个个体划分为 k 个类。聚类操作可以在一组数据中发现不同数据之间的联系, 将一组信息进行分类, 类内的相似性越大, 个体越相似, 类间差别也越大, 代表聚类效果越好。

在聚类时, 按照种群中个体之间欧式距离的大小, 将个体划分为 k 个类, 此时具有更加相似特征的个体会被分为同一个类。假设种群为:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N\} \quad (12)$$

其中, x_i 是 d 维数据, 将种群分为 k 类, 即 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_k\}$ 类, 第 t 个类的聚类中心为 c_{ij} 。在本文进行聚类划分时, 使用负载均衡和最短路径两个数据进行衡量。即种群中个体 x_i 对应的适应值 $G(x_i)$ 是二维数据, 第一维表示负载均衡的大小, 第二维表示最短路径的大小, 其表示为:

$$G(x_i) = \{D_i, R_i\} \quad (13)$$

种群 X 中的个体 x_i 与聚类中心 c_{ij} 的距离用 $\text{dist}(x_i, c_{ij})$ 表示。聚类中心的衡量标准用以下函数表示:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x_i \in c_i} \text{dist}(x_i, c_{ij}) \quad (14)$$

式中, E 是所有类内距离之和; $\text{dist}(x_i, c_{ij})$ 计算的是当前个体与聚类中心之间的距离, 在本文中距离的计算方式采用欧式距离, 公式如式(15)所示。 E 越小聚类效果越好。

$$\text{dist}(x_i, c_{ij}) = \sqrt{(D_{ij} - D_i)^2 + (R_{ij} - R_i)^2} \quad (15)$$

聚类操作可以改善搜索区域, 算法一般采用 K-means、fuzzy-C-means 等。头脑风暴算法中采用的是 K-means 算法, 聚类函数通常选用均方差的形式, 公式如下:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x_i \in c_i, v_i \in c_i} (x_i - v_i)^2 \quad (16)$$

其中, x_i 表示种群中的个体, v_i 是类 c_i 中个体的均值, E 是种群中个体均方差的和。

由于目标函数值为 $G(x)$, 当它的值越大时, 得到的个体越差。但是为了易于理解, 一般适应度越大, 该个体的表现越好, 因此, 可以对目标函数值 $G(x)$ 进行取倒数操作, 取倒数之后的目标函数值即是适应度函数。

即适应度函数定义为:

$$\text{adapt}(x_i) = \frac{1}{G(x_i)} \quad (17)$$

其中, x_i 表示第 i 个个体对应的解空间, $\text{adapt}(x_i)$ 是该个体对应的适应值。此时, 适应度值越高则表示想法越好, 越容易被延续至下一代。

2.3 更新想法

随机思考主要用于跳出局部最优解, 是聚类中心独有的操作。随机思考的过程为, 首先产生一个在 0~1 之间的随机数, 根据这个随机数和概率 P_c 的大小判断是否进行随机思考, 若 P_c 大于随机数, 则随机选择一个类, 将该类的聚类中心进行替换, 替换的个体可以是解空间的任何一个解。

随机思考完成之后, 算法会以一定的概率选择独立思考还是融合思考。假设该概率为 P_a , 首先产生一个随机数, 若 P_a 大于随机数, 则进行独立思考, 否则融合他人。

独立思考是一个类内变异操作。在独立思考时, 算法首先会根据概率 P_o 选择需要对哪一个类进行变异。概率 P_o 的计算公式如下:

$$P_o(j) = \frac{|\text{num}_j|}{N} \quad (18)$$

式中, j 代表当前选择的类, num_j 代表第 j 个类中个体的个数, N 代表种群中个体的数量。 $P_o(j)$ 则表示每个类中的想法占总想法的比重。

在选择好进行独立思考的类之后, 需要选择使用类中哪个个体进行独立思考。此时, 概率 P_{co} 决定了是否选择聚类中心作为独立思考的个体。将 P_{co} 的值与随机数进行比较, 若大于随机数则选择聚类中心, 否则选择除聚类中心外的其他任何一个个体。需要独立思考的个体选择完成之后, 执行产生新个体的操作。在产生新个体时, 根据如下公式进行选择:

$$x_{\text{new}}^d = x_{\text{select}}^d + \xi \cdot N(\sigma, \mu) \quad (19)$$

式中, x_{new}^d 表示当前个体新产生的想法第 d 维的值, x_{select}^d 表示被选择产生新想法的当前个体的第 d 维的值。 $N(\sigma, \mu)$ 表示期望为 σ 、方差为 μ 的高斯随机分布函数, 步长 ξ 表示一个权重系数, ξ 的计算方式如下:

$$\xi = \text{logsin}\left(\frac{0.5 \cdot \max_{\text{iter}} - \text{cur}_{\text{iter}}}{\text{kslope}}\right) \cdot \text{rand}() \quad (20)$$

其中, \max_{iter} 是最大迭代次数, cur_{iter} 是当前迭代次数;

kslope 表示对数函数的斜率, 一般取值为 20; $\text{rand}()$ 是一个 0~1 之间的随机数。 $\text{logsin}()$ 是一个对数传递函数, 它的表达式如下:

$$\text{logsin}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (21)$$

除独立思考以外, 当概率 P_a 大于随机值的时候, 使用融合他人的方式产生新个体。融合他人的方式表示选择两个个体生成新个体, 在选择个体时, 可以选择两个聚类中心进行融合, 也可以选择随机两个个体进行融合, 具体选择那种个体取决于概率 P_a 和随机值的大小, 若 P_a 大于 0~1 之间的随机值则选择随机两个聚类中心进行融合, 否则选择类中随机两个个体进行融合。融合规则如下:

$$x_{\text{combined}} = \lambda x_A + (1 - \lambda) x_B \quad (22)$$

其中, x_{combined} 是融合后的想法; x_A 和 x_B 表示两个类中的想法; λ 是 0~1 之间的随机数, 是混合的权重系数。假设当前选中要融合的两个个体为 N_1 和 N_2 , N_1 的第一条通信流的权重系数为 (0, 10, 7), 个体 N_2 的第一条通信流的权重系数为 (4, 9, 2), 将两个个体的第一条通信流的权重因子根据式 (22) 进行融合, 此时会产生一组新的权重系数 $(0 \cdot \lambda + 4 \cdot (1 - \lambda), 10 \cdot \lambda + 9 \cdot (1 - \lambda), 7 \cdot \lambda + 2 \cdot (1 - \lambda))$, 选出该组权重系数中的最大值作为新的个体的第一条通信流权重, 选择它相应的编码作为新个体的编码。对于每一条通信流都进行这样的操作之后, 融合后的新个体就产生了。

2.4 算法终止条件

在独立思考和融合思考中, 保留的是适应度较高的个体。例如独立思考中产生的新个体 x_{new} 的适应度高于原来的个体 x_{old} , 则使用新个体替换原来的个体; 否则种群不发生变化, 还是保留原来的个体 x_{old} 。若融合方式产生的新个体 x_{combined} 的适应度高于个体 x_A , 则对个体 x_A 进行替换; 否则再比较个体 x_B 。

每一轮迭代结束之后, 判断是否达到预先设置的最大迭代次数。若是, 算法结束, 此时适应度最高的个体即是算法最优解; 否则继续下一次迭代, 下一轮迭代仍然从随机思考开始。同时, 算法迭代次数需要选择一个合适的值, 若迭代次数过少, 可能解还未成熟就已经结束, 只能得到次优解, 影响算法的解的质量; 若迭代次数过多, 则会造成算法执行时间过长, 影响算法整体效能。

3 仿真结果及对比分析

3.1 实验环境

拓扑环境如图 3 所示, 图中包含 13 个节点, 其中 0、1、2、4、5、9、11、12 表示为端系统, 3、6、7、8、10 表示为交换机。为了便于链路负载的计算, 同时将链路也进行标号, 表示为 1~16 的数字。每一条链路都是双向通信。同时, 本文预先设定了 500 条通信流, 部分通信流信息如表 2 所示。TT 消息的一般帧长范围是 $(L_{\min}=64 \text{ B},$

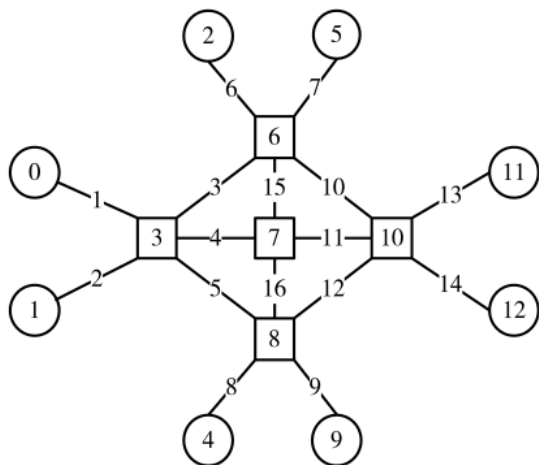


图3 抽象后的网络拓扑

$L_{max}=1\ 518\ B$), 在本文实验中, 每个消息帧长设为不同的值, 周期均为 $T=4\ ms$, 暂不考虑其他约束条件, 例如由拥塞引起的时延等。同时, 每一条消息均是单源单目, 即每条消息只含有一个起始节点和一个目的节点。

在本文中, 设置通信流个数为 500, 每个通信流含有的可行路由数 routecount 是一个不定值, 每条通信流都有不同的可行路由数目。将通信流 Message i 简写为 M_i , 表 2 列出了 10 条通信流的源节点和目的节点。

表 2 TTE 网络拓扑的通信流

消息	起始节点	终止节点	帧长/B	周期/ms
M1	0	5	64	4
M2	0	11	64	4
M3	1	4	128	4
M4	1	12	256	4
M5	2	9	64	4
M6	2	12	512	4
M7	4	5	128	44
M8	4	1	512	4
M9	5	0	1 024	4
M10	5	11	256	4

由此, 通过深度优先搜索便可以得到 500 条通信流的所有可行路径, 作为算法的可行解集合。

在算法环境的配置中, 种群大小设为 popsize, 聚类个数 $k=5$ 。即一个种群中含有 popsize 个个体, 每一个个体都含有 500 条通信流的某一个可行路径, 随机数由 $1+\text{rand}()\%\text{routecount}$ 确定, 其中, rand() 函数是用来取随机值的函数, 该式可以产生 $1\sim\text{routecount}$ 随机数。并且在聚类划分时将种群分为 5 类进行迭代。

3.2 算法结果对比分析

本文设置不同的种群数量, 观察在不同的种群数量下头脑风暴优化算法和传统遗传算法呈现的变化趋势。分别给出了两种算法初始种群和最终种群中最佳个体适应度、均方差和经过的链路跳数的变化, 进行了算法

内部纵向比较, 验证两种算法的优化效果。同时, 在一定的种群数量下, 给出了两种算法规划后在拓扑核心区域消息的分配情况, 表征算法最优解在拓扑中的分布情况。最后根据算法迭代中适应度变化曲线对两种算法的收敛趋势进行对比分析。

头脑风暴优化算法和传统遗传算法在算法执行前后种群中最佳个体的适应度、均方差和经过链路数量的变化百分比如表 3 所示。

表 3 算法得迭代前后个体指标变化表

实验序号	遗传算法			头脑风暴算法		
	适应度	均方差	经过的链路数量	适应度	均方差	经过的链路数量
1	↑ 299%	↓ 68.49%	↓ 534	↑ 263%	↓ 69.55%	↓ 225
2	↑ 301%	↓ 67.14%	↓ 492	↑ 343%	↓ 72.27%	↓ 516
3	↑ 380%	↓ 72.45%	↓ 674	↑ 367%	↓ 73.86%	↓ 446

图 4 和图 5 是在抽象拓扑中展示了当种群数量为 200 时, 头脑风暴算法和遗传算法链路的负载情况。其中 0、1、2、4、5、9、11、12 表示端系统, 端系统没有负载均衡的意义, 因为对于每一条通信流, 从端系统出发到

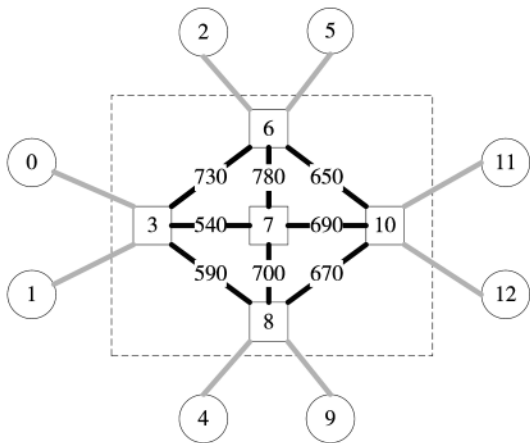


图 4 遗传算法最优个体负载分布

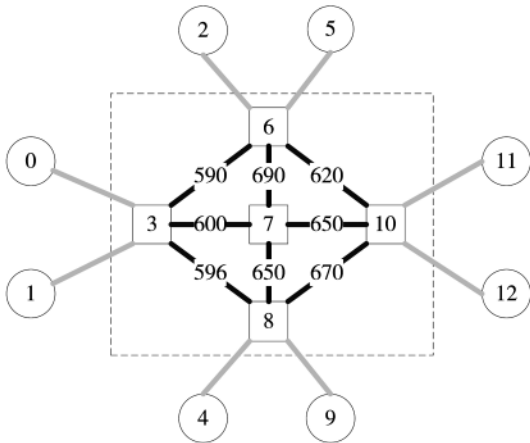


图 5 头脑风暴算法最优个体负载分布

(下转第 103 页)

5 结论

现有的毫米波检测算法受图像中隐匿物品与人体之间的灰度差异影响较大,检测效果不够明显。因此,本文根据毫米波图像的特点,结合频域显著性及背景抑制的思路检测,相比于传统的检测算法有着更好的检测性能。然而在处理结构复杂的人体区域时会将人体结构误检为隐匿物品,后续的工作将会从这一角度出发,结合人体各部位结构特点排除误检,提高检测性能。

参考文献

- [1] HARAZ O M, ASHRAF M A, SEBAK A R, et al. Detection of metallic and nonmetallic concealed targets based on millimeter-wave inverse scattering approach[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2020, 30(9): e22290.
- [2] 师君, 阙钰佳, 周泽南, 等. 近场毫米波三维成像与异物检测方法[J]. 雷达学报, 2019, 8(5): 578-588.
- [3] 王崇剑, 孙晓玮, 杨克虎. 一种用于主动式毫米波图像的

(上接第 98 页)

达下一个节点之间的链路是唯一的,由通信流起始和终止节点决定,因此从端系统出发的线段都标记为浅灰色,不做区分。虚线框区域是由交换机组成的主干网络,所有通信流都必须经由这里到达其他节点,这里是负载均衡的核心区域。图中灰色线段的深浅表示了这条链路的负载情况。

可以看出,头脑风暴算法在经过迭代后,此区域的负载已经趋近于均衡,链路上所经过的负载大部分都分布在 590~690 之间。而遗传算法,负载分布在 540~780 之间,较头脑风暴优化算法的结果稍差。

4 结论

虽然 TTE 网络目前在国外的研究已经处于非常成熟的阶段,但是目前国内还处于研究起步阶段,特别是针对 TTE 网络的链路规划还鲜少有研究成果的发表。本文提出将头脑风暴优化算法应用于 TTE 网络的链路调度规划,克服了手工配置的缺点,利用算法本身的自适应性,自动地对于拓扑环境下的 TTE 消息进行了路径规划,提升了 TTE 网络传输的效率,也增强了 TTE 网络的实时性和可靠性。

参考文献

- [1] LONG H, SHEN Y, GUO M, et al. LABERIO: dynamic load-balanced routing in OpenFlow-enabled networks[C]//2013 IEEE 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications(AINA). Piscataway: IEEE, 2018: 290-297.
- [2] LIU B, CHEN M, XU B, et al. An OpenFlow-based performance-oriented multipath forwarding scheme in datacenters[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering,

低复杂度隐匿物品检测方法(英文)[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(1): 32-38.

- [4] 杜琨, 王威, 年丰, 等. 主动毫米波图像的人体携带危险物检测研究[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(6): 1462-1469.
- [5] DU K, ZHANG L, CHEN W, et al. Concealed objects detection based on FWT in active millimeter-wave images[C]//Seventh International Conference on Electronics and Information Engineering. SPIE, 2017, 10322: 386-391.
- [6] İŞİKER H, ÖZDEMİR C. A multi-thresholding method based on Otsu's algorithm for the detection of concealed threats in passive millimeter-wave images[J]. Frequenz, 2019, 73(5-6): 179-187.
- [7] WANG X, GOU S, WANG X, et al. Patch-based Gaussian mixture model for concealed object detection in millimeter-wave images[C]//TENCON 2018-2018 IEEE Region 10 Con-

(下转第 109 页)

2019, 17(7): 647-660.

- [3] 吴宇文. 基于 OpenFlow 的网络负载均衡算法的研究与设计[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [4] LI Y, PAN D. OpenFlow based load balancing for FatTree networks with multipath support[C]//12th IEEE International Conference on Communications (ICC '3). Piscataway: IEEE, 2013: 1-5.
- [5] HERTIANASN, KURNIAWAN. A joint approach to multipath routing and rate adaptation for congestion control in OpenFlow software defined network[C]//2015 1st International Conference on Wireless and Telematics(ICWT). Piscataway: IEEE, 2015: 1-6.
- [6] 刘美辰. 多跳时间触发以太网调度优化机制与算法的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [7] 刘红, 白栋, 丁炜. 应用于 MPLS 网络负载均衡的启发式自适应遗传算法研究[J]. 通信学报, 2017(10): 39-45.
- [8] 叶帆, 陈银超, 王涛, 等. 基于负载均衡的大规模 TTE 消息调度表生成方法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2022, 59(4): 6-14.
- [9] 王红春. 面向 DIMA 应用的时间触发以太网性能优化与评估技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.

(收稿日期: 2022-03-12)

作者简介:

郑小鹏(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 飞行器总体设计。

张涛(1976-), 通信作者, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 综合电子软件架构技术, E-mail: tao_zhang@nwpu.edu.cn。

王小辉(1981-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向: 飞行器总体设计、综合电子总体集成设计。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所