

GCTA:一种群组命令传输算法

章 刚¹,陈庆奎^{1,2}

(1. 上海理工大学管理学院,上海 200093;2. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院,上海 200093)

摘 要: 基于尽力而为服务模式的 Internet,在支持群组命令传输过程中,容易产生路径竞争问题. 定义出有效路径统计网络,并进一步定义出基于有效路径统计网络的群组多约束多目标优化问题. 提出一种群组命令传输算法. 该算法,分别定义出模糊球体划分、连续空间蚁群搜索及重叠区域解可信度衰减策略. 实验从服务延迟率和传输成功率两个方面,验证了该算法在支持群组命令传输过程的有效性.

关键词: 群组命令传输; 群组多约束多目标优化; 路径竞争; 蚁群算法;

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)02-0413-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.02.024

GCTA: A Group Command Transmission Algorithm

ZHANG Gang¹, CHEN Qing-kui^{1,2}

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: It is a problem that the best-effort service model standing for group command transmission causes path competition. To solve the problem, this paper firstly defines effective path statistics network (EPSN) based on Internet, and further describes group multi-constraints multi-objectives optimization problem based on the EPSN. This paper proposes a group command transmission algorithm. The algorithm defines fuzzy ball division, continuous space ant colony optimization and overlapped area solution reliability reduction respectively. The experiment tests validity of the algorithm from service delay rate and transmission success rate.

Key words: group command transmission; group multi-constraints multi-objectives optimization problem; path competition; ant colony optimization;

1 引言

物联网作为 Internet 的一种扩展^[1-3],其核心思想不仅可以“感知”而且期待“可控”. 物联网运营中心(中心)作为“可控”关键技术,其主要功能是能够通过 Internet 传输一组具有多约束的命令到分散在不同大区域(跨市、区)的终端设备,并且所有命令必须在约束范围内全部到达,任何单一命令丢失被视为传输失败. 由此可知,物联网运营中心的本质是基于 Internet 的群组命令传输(Group Command Transmission, GCT)过程.

然而,Internet 尽力而为的服务模式并不支持 GCT 传输过程. 其主要原因是尽力而为的服务模式试图独立地

为 GCT 中每个命令提供有效路径,这样容易造成多个命令竞争同一路径. 当该路径无法同时满足多个命令传输需求时,会导致网络拥塞,从而使得 GCT 传输失败.

当前,针对 GCT 的研究工作较为少见^[4-6]. 文献[7]提出多路径并行传输,其主要思想是基于多条不相交路径并行通信方式实现单源-目的节点对之间的数据传输,优点在于减少拥塞提高网络吞吐量,但会存在路径竞争问题. 文献[8,9]分别提出了多条分离最优路径算法,但主要基于一对一通信模式考虑,并且都没有考虑冲突避让机制^[10]. 文献[11]定义一种基于精确参数的 K 条最短无环路由 Yen 算法,该算法针对给定两节点之间计算 K 条最短无环路由,优势在于路径选择算

收稿日期:2014-06-19;修回日期:2015-01-15;责任编辑:蓝红杰

基金项目:国家自然科学基金(No. 60970012);高等学校博士学科点专项科研博导基金(No. 20113120110008);上海重点科技攻关项目(No. 14511107902);上海市工程中心建设项目(No. GCZX14014);上海智能家居大规模物联共性技术工程中心项目(No. GCZX14014);上海市一流学科建设项目(No. XTKX2012);沪江基金研究基地专项(No. C14001)

法上限随 K 值线性增加. 文献[12]提出一种无环第 K 条最大可用带宽路径算法 KWABP, 该算法分别计算第 K 条最大可用带宽数和计算第 K 条最大可用带宽路径. 算法 Yen 及 KWABP 也只是针对一对一通信模式考虑, 同样会产生路径竞争问题.

IPv6 组播技术是下一代 Internet 研究的热点^[13], 但是其也并不能支持 GCT 过程, 主要原因是 IPv6 通过复制技术传输组播分组, 而 GCT 中每个命令不相同, 所以不能通过复制传输.

针对此, 本文在 Internet 上配置一些通信代理节点 CSA (Communication Service Agent, CSA), 通过 CSA 构建物联网运营中心所涉及 Internet 局部区域的骨架网络, 也即有效路径统计网络 (Effective Path Statistics Network, EPSN), 并基于该网络构建有效路径 EP (Effective Path, EP) 集, 进而基于 EP 集支持 GCT 传输过程.

EPSN 网络构建意义在于, 通过测量与统计手段实时挖掘出 Internet 路径上的有效“空隙” (EP 集), 利用这些有效“空隙” (EP 集) 更好地实施 GCT 传输过程.

在 GCT 中, 每个命令传输过程可以转换为多约束多目标优化问题 (Multi-Constraints Multi-Objectives Optimization Problem, MCMOOP). 对 GCT 而言, 其可以转换为群组多约束多目标优化问题 (Group Multi-Constraints Multi-Objectives Optimization Problem, GMCMOOP).

综上, 本文重点讨论的问题是, 基于 EPSN 的 GMCMOOP 问题.

2 问题描述

设 $G = (V, E)$ 表示为 EPSN 网络, 其中 V 为 CSA 集合, E 为 CSA 之间链路集合, 每条链路 $e \in E$ 上都拥有一组度量参数 $k (k = 1, 2, \dots)$, f_k 表示参数 k 所对应的子目标函数, 现给定一组子目标函数 $f_k (k = 1, 2, \dots)$ 的约束值 $C_k (k = 1, 2, \dots)$, 则:

基于 EPSN 的 MCMOOP 问题建模: 在 EPSN 上, 寻找一组有效解路径 x , 在 x 的每个分量子目标函数 $f_k (x) (k = 1, 2, \dots)$ 满足约束 $C_k (k = 1, 2, \dots)$ 条件下, 使得 MCMOOP 问题的总目标函数 $f(x)$ 最优:

$$\begin{aligned} \text{Max } f(x) &= \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\}, \\ \text{s. t. } &\begin{cases} f_k(x) \leq C_k, k = 1, 2, \dots \\ x \in \text{GEP} \\ \text{GEP} \subseteq \text{EP} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示 n 维有效解路径, $f_k(x)$ 表示解路径 x 的第 k 分量子目标函数, C_k 表示 $f_k(x)$ 对应的约束值, EP 表示所有测量与统计有效路径集, GEP 表示满足式(1)的有效路径集.

基于 EPSN 的 GMCMOOP 问题建模: 在 EPSN 上, 寻找多组有效路径集 $\text{GEP}_j (j = 1, 2, \dots)$, 在使得 $\forall j$,

$\text{MCMOOP}_i (i = 1, 2, \dots)$ 问题所对应的 $\text{GEP}_i (i = 1, 2, \dots)$ 满足公式(1), 且使得任意两个有效路径集 $\text{GEP}_i (i = 1, 2, \dots)$ 与 $\text{GEP}_j (j = 1, 2, \dots)$ 之间不存在公共解 (或交集):

$$\begin{aligned} F &= \{\text{Max } F_1, \text{Max } F_2, \dots, \text{Max } F_L\} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \forall i, j, \text{GEP}_i, \text{GEP}_j \subset \text{EP}, i, j = 1, 2, \dots \\ \forall i, j, \text{GEP}_i \cap \text{GEP}_j = \emptyset \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, L 表示 GMCMOOP 问题规模, F 表示 GMCMOOP 问题的总体目标函数, $F_j, j = 1, 2, \dots$ 表示第 j 个 MCMOOP 问题的目标函数, $\text{GEP}_j, j = 1, 2, \dots$ 表示第 j 个 MCMOOP 问题的有效路径解集.

3 GCTA (Group Command Transmission Algorithm, GCTA) 算法

3.1 模糊球体划分

本文根据球隙搜索思想^[14]进一步优化, 定义出模糊球体划分策略. 以下, 给出相关概念:

定义 1 模糊超球体区域 (Fuzzy Monster Ball Zone, FMBZ): 设多元组 $FB_z(o, r, n_l, s, U(s, c))$ 为 FMBZ, 其中 o 表示球体中心, r 为半径^[14], n_l 为问题规模, $U(s, c)$ 为解 s 满足约束 c 的可信度^[15], 则:

$$\begin{aligned} &FB_z(o, r, n_l, s, U(s, c)) \\ &\equiv \left\{ \begin{aligned} &\sum_{i=1}^{n_l} (x_i - o_i)^2 = r^2 \mid \forall j, \sum_{i=1}^{n_l} (s_j^i - o_i)^2 \leq r^2, \\ &\forall s_j, U(s_j, c) \leq Q_{fbz}, Q_{fbz} \in (0, 1), r > 0, n_l > 1 \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, Q_{fbz} 表示可信度阈值.

定义 2 划分 FMBZ (Cut Fuzzy Monster Ball Zone, CFMBZ): FMBZ 划分过程需要考虑以下两种情况:

(1) 当 FMBZ 区域中解的分布属于均匀分布时, 设 r 为 FMBZ 区域半径, 每个小区域半径为 $\frac{r}{2m} (m \geq 1)$, 则每个小区域利用如下公式计算:

$$\sum_{i=1}^n (x_i - c_i)^2 = \left(\frac{r}{2m}\right)^2 \quad (4)$$

其中, n 为空间维数, x 为空间坐标, c 为中心点, 且 $\left(\frac{r}{2m}\right) \in (0, r)$.

(2) 当 FMBZ 区域中解的分布属于非均匀分布时, 首先根据公式(5)计算所有解之间的解密度.

$$SD(x, y) = \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n |x(x_k) - y(y_k)|^m \right)^{\frac{1}{m}} \quad (5)$$

其中, $SD(x, y)$ 为解密度, 主要表示为解之间的紧密程度, x_k, y_k 分别表示解 x, y 的属性变量, k 为维数变量, m 为参数.

接着, 根据 SD 计算结果, 按照阈值进行聚类, 并对每个子类按照情况 1 处理.

3.2 连续空间蚁群搜索

3.2.1 区域内搜索过程:

对于蚂蚁 k_{ant} 从当前解 x_i 转移到下一个解 x_j 概率定义为:

$$p^{k_{ant}}(x_i, x_j) = \begin{cases} \frac{[\tau^{k_{ant}}(x_j)]^\alpha [\eta^{k_{ant}}(x_j)]^\beta [U^{k_{ant}}(x_j, c_j)]^\gamma}{\sum_{s \in \text{FMBZ_Sub}} [\tau^{k_{ant}}(x_s)]^\alpha [\eta^{k_{ant}}(x_s)]^\beta [U^{k_{ant}}(x_s, c_s)]^\gamma}, & \text{if}(s \in \text{FMBZ_Sub}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

其中, FMBZ_Sub 表示蚂蚁 k_{ant} 所在的当前子空间区域, α, β 和 γ 分别为参数, $U^{k_{ant}}(x_j, c_j)$ 表示蚂蚁 k_{ant} 选择解 x_j 时, 解 x_j 满足约束 c_j 的可信度. $\eta^{k_{ant}}(x_j)$ 表示蚂蚁 k_{ant} 迁移到下一个解 x_j 的启发式信息, 且 $\eta^{k_{ant}}(x_j) = F^{k_{ant}}(x_j) - F^{k_{ant}}(x_i)$, 其中 $F^{k_{ant}}(x_i)$ 表示蚂蚁 k_{ant} 的当前解 x_i 的目标函数值.

$$\tau_{x_j}^{k_{ant}}(T+1) = (1 - \mu) \tau_{x_j}^{k_{ant}}(T) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{x_j}^{k_{ant}} \quad (7)$$

其中, $\tau_{x_j}^{k_{ant}}(T)$ 表示 T 时刻解 x_j 的信息素, μ 表示解 x_j 信息素挥发度, m 表示蚂蚁数目:

$$\Delta \tau_{x_j}^{k_{ant}} = \begin{cases} \frac{x_j}{x_i}, & \text{if } x_j \text{ dominate } x_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

同时定义在区域内搜索过程中, 任意蚂蚁的转移规则:

$$p^{k_{ant}}(x_i, x_j) = \begin{cases} \max_{j=1,2,\dots,m} \{p^{k_{ant}}(x_i, x_j)\}, & \text{if}(q \geq q_0) \\ p^{k_{ant}}(x_i, x_j), & \text{if}(q < q_0) \end{cases} \quad (9)$$

其中, q 表示随机变量, q_0 表示随机常数. 当 $q \geq q_0$, 则蚂蚁选择为具有最大转移概率的解; 当 $q < q_0$, 则蚂蚁利用轮盘的方式, 随机选择下一解.

3.2.2 区域间搜索过程

由于 FMBZ 空间区域中, 每个解都有可信度 $U(x, c)$, 因此对于任意一个被分割区域 z_i 都存在区域平均可信度, 则

$$U_{z_i}(X, C) = \lambda \left[\frac{\sum_{j=1}^{n_i} U(x_j, c_j)}{n_i} \right] \quad (10)$$

其中, $U_{z_i}(X, C)$ 表示区域 z_i 的平均可信度, X 表示区域 z_i 解集合, C 表示解集合对应的约束集, $\lambda (\lambda > 0)$ 表示常数系数.

则蚂蚁 k_{ant} 从区域 z_i 转移到区域 z_j 概率定义为:

$$\text{Trans}^{k_{ant}}(z_i, z_j) = \begin{cases} \frac{[\tau^{k_{ant}}(z_i, z_j)]^\alpha [\eta^{k_{ant}}(z_i, z_j)]^\beta [U_{z_j}(z_i, z_j)]^\gamma}{\sum_{s \in \text{FMBZ}} [\tau^{k_{ant}}(z_i, z_s)]^\alpha [\eta^{k_{ant}}(z_i, z_s)]^\beta [U_{z_s}(z_i, z_s)]^\gamma}, & \text{if}(s \in \text{FMBZ}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

其中, FMBZ 表示蚂蚁所在的解空间区域, α, β 和 γ 分别为参数, U_{z_j} 表示当前区域平均可信度. τ 为转移区域期望吸引度浓度描述为:

$$\tau_{z_j}^{k_{ant}}(T+1) = (1 - \rho) \tau_{z_j}^{k_{ant}}(T) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{z_j}^{k_{ant}} \quad (12)$$

ρ 表示吸引度浓度挥发度, z_j 表示区域, m 表示蚂蚁数目, T 表示时刻, 且:

$$\Delta \tau_{z_j}^{k_{ant}} = \begin{cases} \frac{Q}{L_{z_j}^{k_{ant}}}, & \text{if } L_{z_j}^{k_{ant}} > 0, j=1, 2, \dots \\ 0, & \text{if } L_{z_j}^{k_{ant}} \leq 0, j=1, 2, \dots \end{cases} \quad (13)$$

$Q (Q > 0)$ 表示常数, $\Delta \tau_{z_j}^{k_{ant}}$ 表示蚂蚁 k 在一次循环迭代过程中, 在区域 z_j 中产生的区域吸引度浓度, $L_{z_j}^{k_{ant}}$ 表示蚂蚁 k 在一次循环迭代过程中, 在区域 z_j 中局部搜索过程中目标函数变化量, 且描述为:

$$L_{z_j}^{k_{ant}} = \frac{\chi}{F^{k_{ant}}(z_j, x_{end}) - F^{k_{ant}}(z_j, x_{start})} \quad (14)$$

其中, $\chi (\chi > 0)$ 表示比例系数, x_{start} 和 x_{end} 分别表示蚂蚁在区域 z_j 中的起始位置和终止位置, $F^{k_{ant}}(z_j, x_{start})$ 和 $F^{k_{ant}}(z_j, x_{end})$ 分别表示区域 z_j 中起始位置的目标函数值和终止位置的目标函数值. η 为期望启发式信息且描述为:

$$\eta^{k_{ant}}(z_i, z_j) = \text{Max}\{F^{k_{ant}}(z_i)\} - \text{Max}\{F^{k_{ant}}(z_j)\} \quad (15)$$

$\text{Max}\{F^{k_{ant}}(z_i)\}$ 和 $\text{Max}\{F^{k_{ant}}(z_j)\}$ 分别表示为蚂蚁在区域 z_i 中和区域 z_j 中获取目标函数最大值. 并且, 设定蚂蚁在区域间转移规则为:

$$\text{Trans}^{k_{ant}}(z_i, z_j) = \begin{cases} \max_{j=1,2,\dots,n} \{\text{Trans}^{k_{ant}}(z_i, z_j)\}, & \text{if } q \geq q_0 \text{ and } U_{z_j} > I \\ \text{Trans}^{k_{ant}}(z_i, z_j), & \text{if } q < q_0 \text{ and } U_{z_j} > I \\ \max_{j=1,2,\dots,n} \{U_{z_j}\}, & \text{if } q \geq q_0 \text{ and } U_{z_j} < I \\ z_i, & \text{if } q < q_0 \text{ and } U_{z_j} < I \end{cases} \quad (16)$$

其中, q 表示服从均匀分布的随机变量, q_0 表示随机常数, I 表示阈值, U_{z_j} 表示区域 z_j 平均可信度.

3.3 重叠区域解可信度衰减策略

(1) 当解被一个 MCMOOP 问题搜索情况下, 其 $U(s, c)$ 可信度衰减过程, 根据下列公式计算:

$$U(s, c) = \begin{cases} \left(1 - \frac{C}{R}\right) U(s, c), & \text{if } C < R \\ 0, & \text{if } C > R \end{cases} \quad (17)$$

其中, C 表示命令所需消耗资源的量, $C = \sum_{k=1}^n \alpha_k C_k$ [16], C_k

表示参数 k 的约束值, α_k 表示 C_k 的权重, $\sum_{k=1}^n \alpha_k =$

1 [16], R 表示路径上剩余资源总量, $R = \sum_{k=1}^n \beta_k f_k$ [16], f_k 表

示参数 k 的子目标函数, β_k 表示 f_k 的权重, $\sum_{k=1}^n \beta_k =$

1^[16], $U(s, c)$ 表示解 s 满足约束 c 的可信度.

(2) 当解被多个 MCMOOP 问题搜索情况下, 其 $U(s, c)$ 可信度衰减过程, 根据下列公式计算:

$$U(s, c) = \begin{cases} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^l C_i}{R}\right) U(s, c), & \text{if } \sum_{i=1}^l C_i < R \\ 0, & \text{if } \sum_{i=1}^l C_i \geq R \end{cases} \quad (18)$$

其中, l 表示竞争总数, C_i 表示第 i 个 MCMOOP 问题所需消耗资源的量, R 表示路径上剩余资源总量, C_i 和 R 定义方式参考公式 (17), $U(s, c)$ 表示解 s 满足约束 c 的可信度.

3.4 GCTA 算法描述

算法 1 GCTA 算法

- Step 1** 分解 GMCMOOP 问题为一组 MCMOOP 问题, 设定每个 MCMOOP 问题所对应约束条件, 对于每个 MCMOOP 问题, 转入 Step 2.
- Step 2** 根据公式 3、4、5 对其搜索区域进行划分, 设定集合 Zone 记录所有划分区域. 对于区域集合 Zone, 在每个子区域分别部署一组蚂蚁, 并转入 Step 3.
- Step 3** 初始化所有参数, 对于蚂蚁 k_{ant} , 首先根据公式 6、7、8、9 对当前子区域进行搜索, 当前子区域内所有蚂蚁迭代次数超过最大值 $Number_{Max}$ 以及当所有子区域内所有蚂蚁搜索完成后, 设定变量数组 AS 记录当前子区域中一组非劣解, 并对 AS 排序, 转入 Step 4.
- Step 4** 为了使得非劣解更加均匀, 根据小生境思想更新 AS, 并赋予变量数组 $First_{Max}$ 中, 转入 Step 5.
- Step 5** 定义变量 i , 设定最大循环次数 $size(First_{Max})$, 如果 $i \leq size(First_{Max})$, 则根据公式 (19) 计算数组 $First_{Max}$ 中解之间的欧式距离:
- $$f(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^L (x_i - y_i)^2} \quad (19)$$
- 其中 x_i 和 y_i 分别表示解 x 和解 y 的坐标分量, 如果 $f(x, y)$ 小于阈值 Q , 则删除当前解, 转入 Step 6.
- Step 6** 首先, 合并 m 个区域的 $First_{Max}$ 并重新排序, 对每个 MCMOOP 问题从更新后的 $First_{Max}$ 中选择最优非劣解并赋值于变量数组 AWS, 并根据公式 17、18 更新每个最优非劣解, 并转入 Step 7.
- Step 7** 设定区域最大迁移次数 $Transfer_{Max}$, 对于蚂蚁 k_{ant} , 根据公式 10、11、12、13、14、15、16 进行区域间搜索, 如果没有超过 $Transfer_{Max}$, 则转入 Step 3; 否则, 则转入 Step 8.
- Step 8** 如果所有 MCMOOP 问题都计算完成, 则记录且合并所有 MCMOOP 中 AWS 数组的解, 并随机删除合并后公共解, 保存退出; 否则, 等待所有 MCMOOP 问题计算完成.

3.5 GCTA 算法有效性证明

证: 假设对任意两个问题 $MCMOOP_i$ 和 $MCMOOP_j$, 在考虑 W, T 两种度量约束条件下, 当 $W_i \leq W_j$, 同时 $T_i \leq T_j$, $MCMOOP_i$ 搜索区域大于 $MCMOOP_j$ 搜索区域, 根

据搜索速度与区域成正比, 则 $MCMOOP_i$ 搜索时间大于 $MCMOOP_j$ 搜索时间, 又由于 $MCMOOP_j$ 约束值要求更高, 其最后有可能优先搜索到最优的解, 而 $MCMOOP_i$ 约束值相对较低, 因此搜索到的解为次优解, 最后使得 $MCMOOP_i$ 和 $MCMOOP_j$ 都能找到有效解. 证毕.

3.6 GCTA 算法收敛性证明

算法主要核心部分为连续空间蚁群搜索过程, 则只需要证明连续空间蚁群搜索过程收敛, 则算法就收敛.

证明: 对于任意蚂蚁, 分别对其区域内和区域间进行搜索选择, 因此收敛性需要分别考虑搜索区域间收敛和区域内收敛.

区域间收敛证明: 当蚂蚁从当前第 i 次迭代直到 $Number_{Max}$, 蚂蚁利用区域间转移规则选择下跳区域搜索. 由于区域划分策略需要考虑两种情况: (1) 解均匀分布时, 区域内每个覆盖圆覆盖区域利用公式 3、4、5 计算, 在有限资源条件下, 覆盖圆数目必然趋近一个常数 $Q (Q \geq 1)$, 因此整个搜索区域是有界的, 则必然收敛; (2) 解不均匀分布时, 区域内每个覆盖圆覆盖区域利用公式 3、4、5 计算, 虽然每个覆盖圆区域大小不一致, 但是在有限资源条件下, 其覆盖圆数目依然是有限, 同样必然收敛.

区域内收敛证明: 由于在区域内解分布依然处于离散状态, 因此在区域内搜索过程可以近似看出离散过程, 则同样需要考虑两种情况: (1) 解均匀分布时, 区域内每个覆盖圆半径存在上下界, 对于任意一个覆盖圆区域, 当蚂蚁以区域内规则在有界区域搜索时, 在第 i 次迭代时, 其对应的状态随机变量用 $x_i = \{\tau(i), w(i)\}$ 表示, 其中 $w(i)$ 表示当前一个解, $\tau(i)$ 表示当前解信息素浓度. $x_i \in \Omega$, 其中 Ω 表示状态全集, 当 $i \rightarrow +\infty$ 时, x_i 组成整个状态全集. 根据文献 [17] 引理 1 和引理 2 证明可知, $x_i = \{\tau(i), w(i)\}$ 所构成的随机过程是有限非齐次 Markov 过程, 根据 Markov 过程收敛性, 该过程能够以概率 1 收敛到一个全局最优解 $x^* = (\tau^*, w^*)$, 且 x^* 属于半径上下界范围内, 因此收敛; (2) 解不均匀分布时, 区域内最大半径覆盖圆其半径依然存在上下界, 对于最大半径覆盖圆区域, 当蚂蚁以区域内规则在有界区域搜索时, 同理收敛, 当最大半径覆盖圆收敛, 则最小半径覆盖圆同样收敛, 因此收敛. 证毕.

4 实验与分析

实验环境配置: 曙光集群 20 个服务器, 每个服务器配置 CPU 为 AMD 皓龙 4122, 内存 4G, 硬盘 300G, 操作系统为 SUSE Linux Enterprise Server 11.

参数设置: $Number_{Max} \in [100, 1000]$, $Transfer_{Max} \in [200, 900]$, $\alpha, \beta, \gamma \in (0.01, 0.99)$, $\lambda, q, q_0 \in (0, 1)$, 并

且根据统计计算 $m \in (5, 12)$ 之间。

网络拓扑结构:利用 Waxmam 模型^[18]随机生成网络拓扑结构。其中,随机网络拓扑结构具有 20 节点,30 链路,并在每条链路上随机产生 $n, n \geq 2$ 个度量参数,链路上度量参数值随机产生,同时每个度量参数的约束随机产生,平均节点度大于 2 小于 7。

网络部署:根据 Waxmam 随机产生的网络拓扑结构,在 Internet 网络环境下,部署 20 个曙光集群服务器,构建 EPSN 网络,并运行 GCTA 算法。

群组命令规模:根据统计可知,群组命令规模平均最小和最大量分别为 75 和 175。

测试性能:

(1) 验证 EPSN 网络规模不断改变下,系统运行 GCTA 算法前后服务延迟率 (Service Delay Rate, SDR) 比较,并且 SDR 描述为:

$SDR = \text{服务延迟时间} / \text{正常服务时间}$

(2) 验证 EPSN 网络规模不断改变下,GCTA 算法与 Yen^[11] 及 KWABP^[12] 之间的群组命令传输成功率 (Transmission Success, TS) 比较:

$TS = \text{传输成功数} / \text{传输总数}$

(3) 验证群组命令规模不断改变下,GCTA 算法与多路并发传输 CMT^[7] 及单播路径选择算法 FPTAS^[19] 之间的群组命令传输成功率比较。

验证 1:在群组命令规模为 175, EPSN 网络规模不断改变下 SDR 比较

图 1 横坐标表示 EPSN 规模数目,纵坐标表示 SDR。PMCS_GCTA 表示 PMCS 运行 GCTA 算法,PMCS 表示 PMCS 没有运行 GCTA 算法。当 EPSN 规模为 5 ~ 10 时,GCTA 算法的服务延迟率接近 32.5%,没有运行 GCTA 算法的服务延迟率接近 40.5%,服务延迟率减少了 19.8%;当 EPSN 规模为 15 ~ 20 时,GCTA 算法的服务延迟率接近 19.5%,没有运行 GCTA 算法的服务延迟率接近 26.5%,服务延迟率减少了 26.4%,总体平均减少 23.1%。

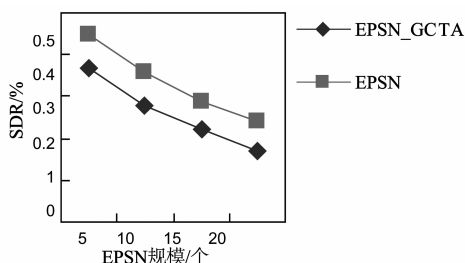


图1 最大量175情况下Internet结构中SDR

验证 2:在群组命令规模为 75, EPSN 网络规模不断改变下 SDR 比较

图 2 横坐标表示 EPSN 规模数目,纵坐标表示 SDR。PMCS_GCTA 表示 PMCS 运行 GCTA 算法,PMCS

表示 PMCS 没有运行 GCTA 算法。当 EPSN 规模为 5 ~ 10 时,GCTA 算法的服务延迟率接近 22.5%,没有运行 GCTA 算法的服务延迟率接近 27.8%,服务延迟率减少了 19%;当 EPSN 规模为 15 ~ 20 时,GCTA 算法的服务延迟率接近 12.5%,没有运行 GCTA 算法的服务延迟率接近 16%,服务延迟率减少了 21.9%,总体平均减少 20.45%。

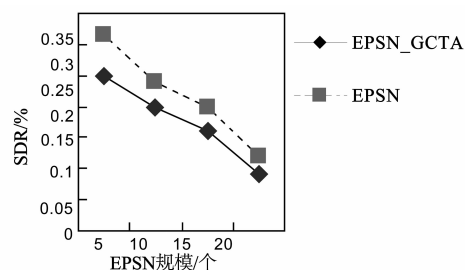


图2 最小量75情况下Internet结构中SDR

根据 SDR 实验结果可知,GCTA 算法随着群组命令规模增大其性能会降低,同时随着 EPSN 网络规模增大会有效增加 GCTA 性能。

验证 3:在群组命令规模为 175, EPSN 网络规模不断改变下 TS 比较

图 3 横坐标表示 EPSN 规模,纵坐标表示 TS。当 EPSN 规模数为 5 ~ 10 时,GCTA 算法传输成功率接近 63.4%,KWABP 算法传输成功率接近 54.5%,Yen 算法传输成功率接近 54.25%,GCTA 算法传输成功率相对于 KWABP 和 Yen 的算法分别提高了 16.33% 和 16.86%;当 EPSN 规模数为 15 ~ 20 时,GCTA 算法传输成功率接近 81.4%,KWABP 算法传输成功率接近 75.4%,Yen 算法传输成功率接近 74.2%,GCTA 算法传输成功率相对于 KWABP 和 Yen 的算法分别提高了 7.95% 和 9.7%。

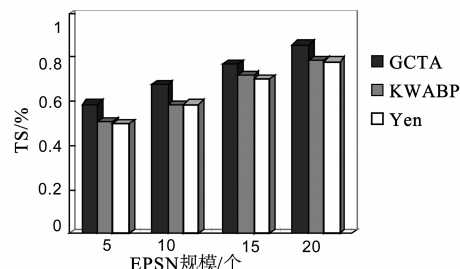


图3 最大量175情况下Internet结构中TS

验证 4:在群组命令规模为 75, EPSN 网络规模不断改变下 TS 比较

图 4 横坐标表示 EPSN 规模,纵坐标表示 TS。当 EPSN 规模数为 5 ~ 10 时,GCTA 算法传输成功率接近 82%,KWABP 算法传输成功率接近 79.3%,Yen 算法传输成功率接近 79.3%,GCTA 算法传输成功率相对于 KWABP 和 Yen 的算法分别提高了 3.4% 和 3.4%;当

EPSN 规模数为 15~20 时, GCTA 算法传输成功率接近 93.3%, KWABP 算法传输成功率接近 87.95%, Yen 算法传输成功率接近 87.3%, GCTA 算法传输成功率相对于 KWABP 和 Yen 的算法分别提高了 6.08% 和 6.87%.

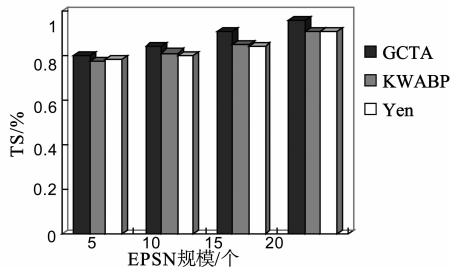


图4 最小量75情况下Internet结构中TS

根据 TS 实验结果可知, 由于 Internet 具有复杂特性, 网络性能极其不稳定且动态变化较快, 同时传输距离较远. 因此, 群组命令传输成功率不高.

验证 5: 验证群组命令规模不断变化下, GCTA、CMT、FPTAS 之间的群组命令传输成功率比较.

图 5 横坐标表示群组命令规模, 纵坐标表示传输成功率. 群组命令规模在 75 到 125 之间, 算法 GCTA 成功率为 90.65%, 算法 CMT、算法 FPTAS 成功率分别为 88.1%、84.8%, GCTA 相对于 CMT、FPTAS 分别提高了 2.8%、7.0%; 群组命令规模在 125 到 175 之间, 算法 GCTA 成功率为 84.7%, 算法 CMT、算法 FPTAS 成功率分别为 81.9%、78.2%, GCTA 相对于 CMT、FPTAS 分别提高了 3.41%、7.84%.

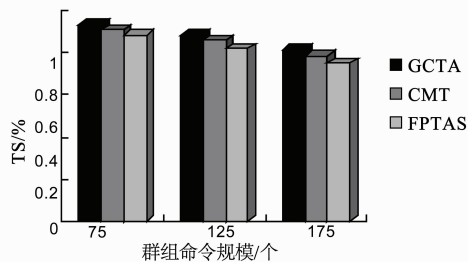


图5 算法传输成功率变化情况

针对丢包率方面, 由于群组命令中的命令通常为一个分组大小. 如果产生丢包, 意味着 GCTA 算法在传输群组命令过程中造成部分命令丢失, 则意味着群组命令传输失败, 需要重新传输. 这点已经通过群组命令传输成功率证明, 并且重新传输机制不是本文研究范围. 因此, 丢包率不需要考虑.

5 结束语

本文从优化理论角度, 分析了 Internet 在传输群组命令过程中, 提出一种启发式群体智能算法 GCTA. 但是, 本文提出的 GCTA 算法, 并没有考虑群体命令传输失败后的重传机制. 因此, 未来工作重点将考虑群组命

令在传输失败后重传机制.

参考文献

- [1] 朱洪波, 杨龙祥, 于全. 物联网的技术思想与应用策略研究[J]. 通信学报, 2010, 31(11): 2-11.
Zhu Hongbo, Yang Longxiang, Yu Quan. Investigation of technical thought and application strategy for the internet of things[J]. Journal on Communications, 2010, 31(11): 2-11. (in Chinese).
- [2] 宁焕生, 徐群玉. 全球物联网发展及中国物联网建设若干思考[J]. 电子学报, 2010, 38(11): 2590-2600.
Ning Huansheng, Xu Qunyu. Research on global internet of things' developments and it's construction in china[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(11): 2590-2600. (in Chinese).
- [3] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1023-1029.
Qian Zhihong, Wang Yijun. IoT technology and application [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(5): 1023-1029. (in Chinese).
- [4] Liu Q, et al. Key technologies and applications of internet of things[J]. Computer Science, 2010, 37(6): 1-4.
- [5] Luigi Atzori, Antonio Lera. From "smart objects" to "social objects": the next evolutionary step of the internet of things [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(1): 97-106.
- [6] Zheng Guosheng, Shu Senyang. A survey on the IETF protocol suite for the internet of things: standards, challenges, and opportunities [J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(6): 91-98.
- [7] Iyengar J R, Amer P D, Stewart R. Concurrent multipath transfer using SCTP multihoming over independent end-to-end paths[J]. IEEE Transactions on Networking, 2006, 14(5): 951-964.
- [8] 熊轲, 裴正定等. 多加性 QoS 约束下的链路分离路由算法[J]. 通信学报, 2010, 31(6): 127-135.
Xiong Ke, Qiu Zhengding. Link-disjoint routing algorithm under multiple additive QoS constraints [J]. Journal on Communications, 2010, 31(6): 127-135. (in Chinese).
- [9] Sawada N, Kaneko K. Pairwise disjoint paths in pancake graphs[A]. Eighth International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, DP-CAT 07 [C]. Washington, DC: IEEE Society, 2007. 376-382.
- [10] Xu D H, Chen Y, Xiong Y Z, Qiao C M, et al. On the complexity of and algorithm for finding the shortest path with a disjoint counterpart[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(1): 147-158.
- [11] Yen J Y. Finding the k shortest loopless paths in a network

- [J]. Management Science, 1971, 11(17): 712 - 716.
- [12] 黄佳庆, 杨宗凯等. 第 K 条最大可用带宽路径算法[J]. 计算机学报, 2004, 27(3): 402 - 408.
Huang Jiaqing, Yang Zongkai. Kth widest available bandwidth path algorithm[J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(3): 402 - 408. (in Chinese).
- [13] 吴建平, 李星, 崔勇. 4over6: 基于非显式隧道的 IPv4 跨越 IPv6 互联机制[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 454 - 458.
Wu Jianping, Li Xing, Cui Yong. 4over6: IPv4 network interconnection over IPv6 backbone without explicit tunneling[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 454 - 458. (in Chinese).
- [14] 胡劲松, 郑启伦. 球隙迁移算法实现全局优化[J]. 计算机学报, 2012, 35(2): 193 - 201.
Hu Jinsong, Zheng Qilun. Sphere-gap transferring algorithm to realize global optimization[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(2): 193 - 201. (in Chinese).
- [15] 张品, 李乐民, 王晟. 运用模糊数解决非确定环境下的路由问题[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1861 - 1866.
Zhang Pin, Li Lemin, Wang Sheng. Using fuzzy number to solve routing problems on the uncertain condition[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1861 - 1866. (in Chinese).
- [16] 王兴伟, 郭磊, 等. 一种智能 ABC 支持型 QoS 切换决策机制[J]. 电子学报, 2011, 39(4): 1 - 9.
Wang Xingwei, Guo Lei, et al. Intelligent QoS handover decision scheme with ABC supported[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4): 1 - 9. (in Chinese).
- [17] 苏兆品, 江建国, 等. 蚁群算法的几乎处处强收敛性分析[J]. 电子学报, 2009, 37(8): 1643 - 1651.
- Su Zhaopin, Jiang Jianguo, et al. An almost everywhere strong convergence proff for a class of ant colony algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(8): 1643 - 1651. (in Chinese).
- [18] Waxman B M. Performance evaluation of multipoint routing algorithms[A]. Proceedings of the INFOCOM'93 Conference[C]. USA, CA, San Francisco. 1993. 980 - 986.
- [19] Xue G L, Sen A, Zhang W Y, et al. Finding a path subject to many additive QoS constraints[J]. IEEE Transactions on Networking, 2007, 15(1): 201 - 210.

作者简介



章 刚 男, 1981 年出生, 江西抚州人. 2007 年毕业于北京大学软件与微电子学院, 2011 年为上海理工大学博士研究生, 从事物联网、网络计算等方面的有关研究.
E-mail: zhanggang198158@163.com



陈庆奎(通信作者) 男, 1966 年出生, 哈尔滨人, 教授、博士、博士生导师, 1987 年和 1996 年分别在吉林大学、哈尔滨工业大学获学士和硕士学位, 从事网络计算、并行计算等方面的研究工作.
E-mail: chenqingkui@gmail.com