

# 基于萤火虫算法的层间网络编码优化<sup>①</sup>

胡杨添秀<sup>②</sup> 孟利民<sup>③</sup> 蒋 维 江培瑞 商宇洲

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

**摘 要** 在异构网络中,分层网络编码不仅可以解决信宿的不同接收速率要求,也可以提高网络吞吐量。其中,层间网络编码与层内网络编码相比可以获得更高的带宽利用率,因此层间网络编码的优化问题成为提高网络性能的一个关键问题。本文考虑单信源多信宿的网络,首先分析了层间网络编码模型的数学规划,再利用改进萤火虫算法(FA)的快速搜索能力实现链路的分层类型和层速率的优化分配,以此实现了网络吞吐量的提高。仿真结果证明,与仅优化链路分层类型的算法相比,此优化算法以较少的迭代次数实现优化并获得高吞吐量。

**关键词** 异构网络, 分层网络编码, 网络吞吐量, 层间网络编码, 萤火虫算法(FA)

## 0 引 言

在异构网络中每个用户对网络带宽速率的要求不同,倘若只用单速率的码流进行数据传输,会导致部分用户无法成功接收和传送数据。为了解决这种差异性需求,学者们结合了信源分层编码和网络编码<sup>[1]</sup>提出了分层网络编码的概念:将信源传输的数据分成多层,分别有基础层和增强层,重要性依次递减,信宿接收到的层数越多,解码时所能获得的重建信息质量也就越高<sup>[2]</sup>;且中间节点采用网络编码对所传输的数据进行编码处理,能够增加传输的有效信息,进而提高了网络吞吐量。

分层网络编码由层内(intra-session)网络编码和层间(inter-session)网络编码组成,层内网络编码只允许同一层的数据进行网络编码,而层间网络编码则允许不同层的数据进行网络编码。分层网络编码在近些年受到了广泛的研究,Zhao 等<sup>[3]</sup>提出了一种 LION 分层网络编码优化方案,实现了网络中的分层类型的最优分配,但是固定速率无法适应多速率的分层组播网络的要求。Zhang 等<sup>[4]</sup>提出了一种

叫 Approx IVM 的近似算法来分配层速率,但是采用的低带宽信宿优先的原则使得网络资源利用率不高。林晓斌等<sup>[5]</sup>提出了基于全局优化的 MRAA 算法以满足不同信宿的要求。沈钦仁<sup>[6]</sup>提出了一种以网络中接收能力与平均值相近的信宿节点来确定层速率的方案来获得最大的吞吐量。张祖凡等<sup>[7]</sup>采用 Edmonds-Karp 算法和层内网络编码结合的方式满足用户节点的链路带宽要求并实现优化分配。而随着仿生算法在通信领域的广泛应用,司菁菁等<sup>[8-10]</sup>将遗传算法(genetic algorithm, GA)和微分进化(differential evolution, DE)算法应用在了分层网络编码中,将链路编码类型作为优化对象,利用仿生算法的搜索能力实现编码类型的最优配置,但是未考虑层速率的优化,仍存在一定局限性。

萤火虫算法(firefly algorithm, FA)<sup>[11]</sup>是 Yang 在 2008 年提出的一种群优化算法,具有输入参数少、易于实现等优点,近些年更是被广泛地应用在难以求解的 NP-Hard 问题之中<sup>[12-14]</sup>,被证明可以有效地实现各种分配问题的优化。本文就是利用了 FA 的快速搜索能力,联合优化链路分层类型和层速率,

① 国家自然科学基金(61372087)资助项目。  
② 女,1993 年生,硕士生;研究方向:网络通信,网络编码等;E-mail: 2111603007@zjut.edu.cn  
③ 通信作者,E-mail: mlm@zjut.edu.cn  
(收稿日期:2018-04-16)

并对 FA 的萤火虫的移动规则进行了改进,实现了层间网络编码的优化分配。

1 网络模型

本文所讨论的网络模型是单信源多信宿异构网络,记为  $G(V,E,S,T)$ , 其中  $V$  是中间节点集合,  $E$  是链路集合,  $S$  是信源节点,  $T$  是信宿节点集合。在网络中,节点之间的链路上的容量不一定都为 1,在本文中为了简化计算,在寻优过程中将链路单位化,节点之间非单位容量的链路可以看作是多条并行的单位链路组成。信源节点  $S$  将数据分成  $L$  层,第 1 层为基本层,第 2 层到第  $L$  层为增强层。表 1 给出了网络模型的部分变量的具体含义。

表 1 网络模型的部分变量

| 变量名称               | 变量描述                                                |
|--------------------|-----------------------------------------------------|
| $r_l$              | 第 $l$ 层的层速率                                         |
| $z_{t,l}$          | 0-1 变量,表示信宿 $t \in T$ 能否接收并解码出 $l$ 层的信息             |
| $\beta_{(t,i)}(e)$ | 0-1 变量,表示链路 $e$ 是否在信源 $S$ 到信宿 $t \in T$ 的第 $i$ 条路径上 |
| $f_{(t,i)}(l)$     | 信源 $S$ 到信宿 $t \in T$ 的第 $i$ 条路径的第 $l$ 层数据所传输的码流     |
| $\delta_l(e)$      | 表示链路 $e \in E$ 传输的第 $l$ 层数据的情况                      |
| $m_t$              | 表示信源 $S$ 到信宿 $t \in T$ 的总路径数                        |

本文为了获得更高的网络资源利用率,所采用的是层间网络编码模型,这是因为层间网络编码除了允许不同编码层的数据进行网络编码操作之外也不需要为各层划分独立的编码子图,因此可以更充分地利用网络资源,灵活性也更强。对于层间网络编码来说,该优化问题可描述为以下的规划问题。

最大化:  $\sum_{t \in T} \sum_{l=1}^L z_{t,l} \times r_l$

满足以下条件:

- (1)  $\sum_{j=1}^{m_t} f_{(t,i)}(l) = z_{t,l} \times r_l$
- (2)  $z_{t,l} \geq z_{t,l+1}$
- (3)  $\sum_{z_{t,w}=1}^L \delta_l(e) = \beta_{(t,i)}(e) \times f_{(t,i)}(l)$
- (4)  $\sum_{l=1}^L \delta_l(e) \leq 1$
- (1)

其中,  $\forall t \in T, \forall e \in E, l = 1, 2, \dots, L$ , 条件(2)中  $l = 1, 2, \dots, L-1$ 。那么条件(1)表示各编码层的传输过程中的码流等于该层的传输速率;条件(2)表示信宿  $t$  只有在成功接收并解码出第  $l$  层的数据后才能接收第  $l+1$  层数据;条件(3)表示如果信宿  $t$  可以接收到第  $l$  层的信息,那么链路  $e$  的分层类型可以在  $[l, L]$  中选择;条件(4)是对链路容量的限制,因为网络中可以选择分层类型的链路均是单位容量的链路,所以链路每次只能选择一种分层类型的数据进行传输。

所要优化的目标是网络吞吐量  $\sum_{t \in T} \sum_{l=1}^L z_{t,l} \times r_l$ , 由 2 个变量  $z_{t,l}$  和  $r_l$  的关系式组成,其中  $z_{t,l}$  的取值依赖于  $r_l$ , 这样的规划问题并不是一个线性规划问题,在求解时具有一定的难度,因此本文决定采用 FA 去解决这样一个复杂的分配问题。

2 优化过程

2.1 标准萤火虫算法(standard firefly algorithm,SFA)

FA 主要是利用萤火虫的发光特性来进行随机优化的,将解空间的可行解模拟成一个个的萤火虫,将优化对象和优化目标分别模拟成萤火虫的位置和亮度,将搜索和优化的过程模拟成萤火虫被比自己亮的萤火虫吸引并移动的过程,而更好的可行解替换较差可行解的过程则是模拟成萤火虫不断地向更亮的萤火虫聚集的过程。

该算法的数学描述<sup>[15]</sup>如下所示。

(1) 萤火虫相对亮度

$$I = I_0 e^{-\gamma r_{ij}} \tag{2}$$

$I_0$  表示最亮萤火虫的亮度,即自身( $r = 0$  处)亮度; $\gamma$  表示光吸收系数,可设置为常数; $r_{ij}$  表示萤火虫  $i$  与萤火虫  $j$  之间的距离。

(2) 萤火虫互相吸引力

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \tag{3}$$

$\beta_0$  表示最大吸引力,通常情况下取 1。

(3) 萤火虫位置变化

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(k+1) &= \mathbf{x}_i(k) + \beta(\mathbf{x}_j(k) \\ &\quad - \mathbf{x}_i(k)) + \alpha(rand - 1/2) \end{aligned} \tag{4}$$

$\mathbf{x}_j(k) - \mathbf{x}_i(k)$  表示萤火虫  $i, j$  之间的笛卡尔距

离,  $\alpha$  表示步长因子,  $rand$  为  $[0,1]$  上服从均匀分布的随机因子。

#### (4) 萤火虫的收敛性分析

在不考虑式(4)扰动因子的时可以变为<sup>[16]</sup>

$$\mathbf{x}_i(k+1) - \mathbf{x}_i(k) = \beta(\mathbf{x}_j(k) - \mathbf{x}_i(k)) \quad (5)$$

这可以看作是  $\mathbf{x}_i(k)$  和  $\mathbf{x}_j(k)$  的偏微分方程,

即:

$$\frac{d\mathbf{x}_i(k)}{dk} = \beta\mathbf{x}_j(k) - \beta\mathbf{x}_i(k) \quad (6)$$

再经过拉普拉斯变换可以得到  $s\mathbf{x}_i(s) + \beta\mathbf{x}_i(s)$

$= \beta\mathbf{x}_j(s)$ , 即:

$$\frac{\mathbf{x}_i(s)}{\mathbf{x}_j(s)} = \frac{\beta}{s + \beta} \quad (7)$$

式(7)可以看作是一个一阶系统, 假设萤火虫  $i$  的亮度没有萤火虫  $j$  的亮度强, 且输入  $\mathbf{x}_j(s)$  是稳定值, 按照系统特性可以得到图 1。随着迭代次数的增加,  $\mathbf{x}_i$  会以指数的形式在第  $K$  次收敛于  $\mathbf{x}_j$ , 即萤火虫  $i$  的亮度移动到萤火虫  $j$  的位置。由此可知 FA 具有稳定性和收敛性, 在有限迭代次数之中可以使得所优化问题收敛到最优解。

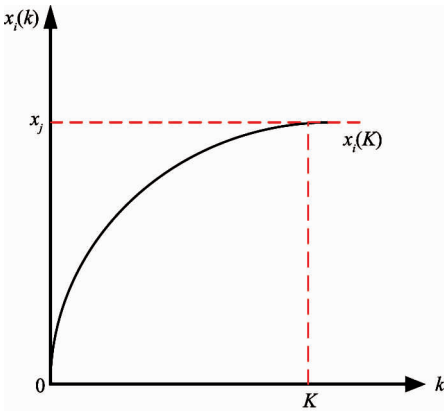


图 1 萤火虫位置更新图

## 2.2 离散萤火虫算法 (discrete firefly algorithm, DFA)

由于 FA 的解空间属于连续空间, 而层间网络编码的优化问题的解空间属于离散空间, 所以需要 SFA 进行离散处理。

### (1) 萤火虫的位置

在层间网络编码优化规划问题中, 每个萤火虫的位置对应的是一个分层类型和层速率的分配方

式, 那么萤火虫的位置可以初始化为一个  $D$  维的矢量:  $\mathbf{X}_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, x_{i,3}, \dots, x_{i,D-(L+1)}, x_{i,D-L}, x_{i,D-(L-1)}, \dots, x_{i,D}]$ , 其中  $D = \sum_{i=1}^{|E|} C(e_i) + L$ , 前  $D-L$  项表示的是链路上的分层类型, 取值范围是  $[1, L]$ , 信源  $S$  的输出链路的分层类型排在序列的最前面, 接下来是各节点的链路分层类型, 对于任意节点  $v \in V$ , 输入链路的分层类型都排在输出链路分层类型的前面且输出链路的分层类型都是从输入链路的分层类型中进行随机选择得到的; 而后  $L$  项表示的是层速率, 按照信宿最大流的大小的种类将信源分层设置为  $L$  类, 记为  $f_1, f_2, \dots, f_L$ , 其中第 1 层的层速率为  $r_1 = f_1$ , 那么接下来的各层速率的取值范围为  $[1, f_1 - \sum_{j=1}^{i-1} r_j]$ ,  $2 \leq i \leq L, 1 \leq j \leq L-1$ , 各层速率均为整数。

### (2) 萤火虫之间的距离

2 个萤火虫位置序列之间的距离可以通过汉明距离  $h_{ij}$  来表示, 汉明距离的大小等于 2 个序列相同位置上不同元素的个数, 这样就找到了适合离散优化问题的萤火虫之间的距离。

### (3) 萤火虫的位置变化

在本文的 DFA 的位置变化过程中, 萤火虫  $i$  向更亮的萤火虫  $j$  移动的规则是:

$$\mathbf{X}_i^{k+1} = \begin{cases} \mathbf{X}_{i,[1,D-L]}^k + \mathbf{X}_{j,[D-(L-1),D]}^k & \frac{1}{h_{ij}} > \alpha(rand - \frac{1}{2}) \\ \mathbf{X}_{j,[1,D-L]}^k + \mathbf{X}_{i,[D-(L-1),D]}^k & \frac{1}{h_{ij}} \leq \alpha(rand - \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中的第 1 个等式表示的是当萤火虫  $i, j$  之间的汉明距离  $h_{ij}$  的倒数大于  $\alpha(rand - \frac{1}{2})$  时, 则将萤火虫  $i$  第  $k$  代的位置的后  $L$  项与萤火虫  $j$  的第  $k$  代的位置的后  $L$  项交换得到萤火虫  $i$  第  $k+1$  代的位置, 这样做的目的是为了使萤火虫  $i$  获得更合理的层速率分配; 第 2 个等式表示的是当萤火虫  $i, j$  之间的汉明距离  $h_{ij}$  的倒数小于等于  $\alpha(rand - \frac{1}{2})$  时, 则将萤火虫  $i$  第  $k$  代的位置的前  $D-L$  项与萤火虫  $j$  的第  $k$  代的位置的前  $D-L$  项交换得到萤火虫  $i$  第  $k+1$  的位置, 这样做的目的是为了使萤火虫  $i$  获

得更合理的链路分层类型分配。例如,假设有 2 只萤火虫 1、2,其中萤火虫 2 的亮度比萤火虫 1 大,萤火虫 1、2 的第 5 代的位置具体如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1^5 &= [1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1] \\ \mathbf{X}_2^5 &= [1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 1] \end{aligned} \tag{9}$$

前 8 项是链路分层类型,后 2 项为层速率,汉明距离  $h_{12}^5 = 4$ , 设置步长因子  $\alpha = 1$ ,  $rand = 0.9$ , 那么  $\alpha(rand - \frac{1}{2}) = 0.4 > \frac{1}{h_{12}^5}$ , 所以萤火虫 1 的第 6 代位置向量由萤火虫 2 第 5 代位置向量的前 8 项和萤火虫 1 的第 5 代位置向量的后 2 项构成,即  $\mathbf{X}_1^6 = [1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 1]$ 。

2.3 层间网络编码优化流程

在 SFA 中,每只萤火虫是在自身的可见范围内与在范围内的萤火虫进行比较与移动,进而完成一次迭代,这使得算法易陷入局部最优而无法收敛。本文提出的算法在萤火虫与整个种群内的萤火虫进行亮度比较,并且在移动后的位置更新中更具有随机性,避免陷入局部最优的情况。具体的基于萤火虫算法的层间网络编码优化流程如图 2。

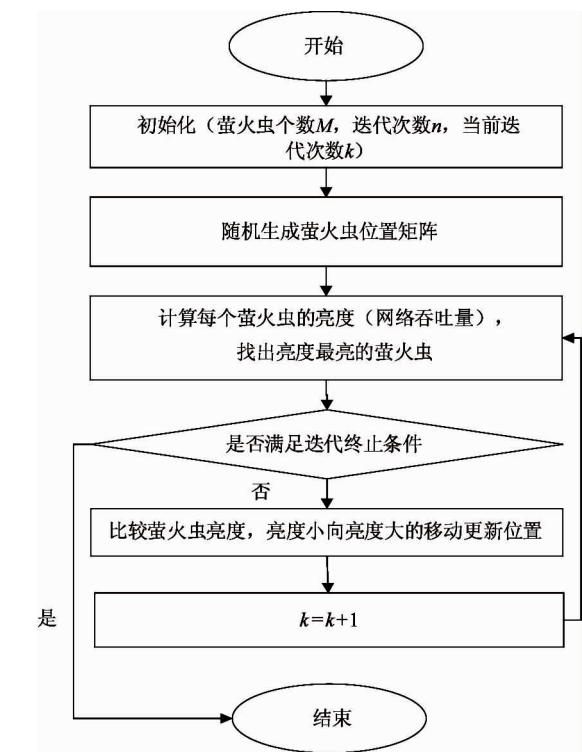


图 2 优化方案的流程图

3 仿真分析

本文的仿真实验平台是 Intel Core i5 (CPU 1.7 GHz, 内存 4 GB) 的微机,并且以 Matlab 2015a 作为仿真实验工具。首先随机生成单信源多信宿的有向无环的网络结构作为实验对象,根据本文所提出的方案为各链路分配最优的分层类型以及为各编码层分配最优的层速率,再用网络编码为网络分配具体的编码方式,这样就得到了相对应的分层网络编码和网络吞吐量。

在参考其他优化问题参数设置的基础上,经过多次实验,并结合本文所优化的网络结构,确定的一些主要参数如下:萤火虫个数  $M = 50$ , 最大迭代次数  $n = 100$ , 步长因子  $\alpha = 1$ , 当前迭代次数  $k = 0$ 。迭代终止条件为当前迭代次数大于最大迭代次数,即  $k > n$ 。

3.1 实例分析

假设有这样一个网络结构如图 3 所示,那么信宿  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  的最大流分别是 2、4、2,那么信源分层的层数是 2 层。

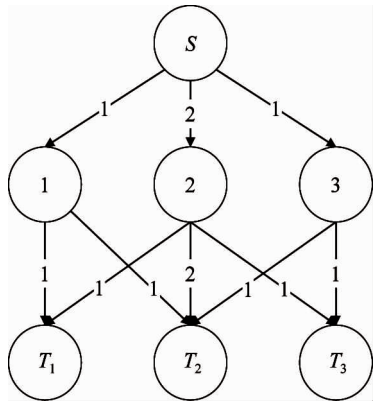


图 3 实例的网络结构

根据文献[3]中的方法可求得层速率分别为 1 和 3,那么第 1 层的编码数据包可记为  $a$ , 第 2 层的编码数据包可记为  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ , 就可以得到图 4 这样的分层网络编码图。信宿  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  均能接收到  $a$ , 那么均可以实现第 1 层的解码,但是 3 个信宿均无法同时接收到第 2 层的编码数据包  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ , 所以无法实现第 2 层的解码,那么这个网络的最大流是 3。

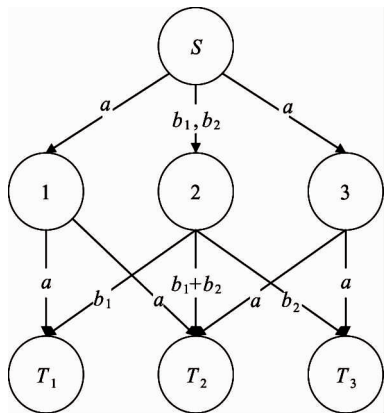


图4 文献[3]的分配方案

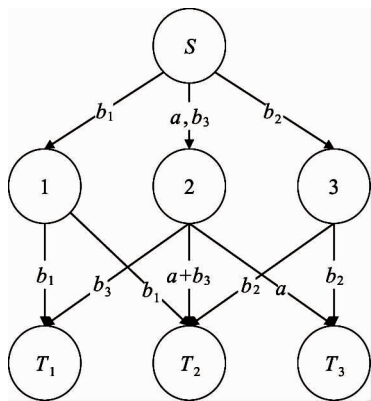


图5 文献[9]的分配方案

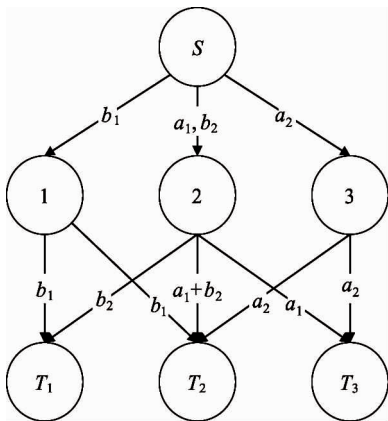


图6 本文的分配方案

而如果采用基于 GA 的层间网络编码分配方案<sup>[9]</sup>仅对链路的分层类型进行优化,那么所得到的分层网络编码图如图 5 所示。信宿  $T_2$ 、 $T_3$  均可以接收到  $a$ , 那么均可以实现第 1 层的解码,除了信宿  $T_2$ , 信宿  $T_1$ 、 $T_3$  无法同时接收到  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ , 无法实现第 2 层的解码,那么这个网络的最大流是 5。

而采用本文中的基于 FA 的分层网络编码的优化方案后,得到的最优层速率是 2、2,那么第 1 层的编码数据包可记为  $a_1$ 、 $a_2$ , 第 2 层的编码数据包可记为  $b_1$ 、 $b_2$ , 再根据最优的链路分层类型分配,可以得到图 6 这样的一个分层网络编码图。信宿  $T_1$  接收到了第 2 层的数据包  $b_1$ 、 $b_2$ , 但是由于分层网络编码需要逐层进行解码,信宿  $T_1$  没有接收到第 1 层的数据包,无法解码重建第 1 层,所以信宿  $T_1$  的吞吐量为 0;而信宿  $T_2$ 、 $T_3$  均能接收到  $a_1$ 、 $a_2$ , 因此可以实现第 1 层的解码,并且信宿  $T_2$  同时接收到了  $b_1$ 、 $b_2$ , 所以信宿  $T_2$  也可以完成第 2 层的解码,所以网络的最大流为 6。相比于以上的 2 种方案,可以获得更高的网络吞吐量。

### 3.2 仿真结果

随机构建 4 个不同节点数的单信源多信宿(信宿个数 3~6 个)网络,链路的容量大小在整数 1~5 之间随机选择,节点数分别为 15、25、35、50。那么所得到的 4 组仿真图如图 7 所示。

对于同一个随机网络来说,采用基于 GA 的层间网络编码分配方案<sup>[9]</sup>、基于 DE 算法的层间网络编码方案<sup>[10]</sup>与本文的优化方案进行处理后,通过仿真图可以看出本文的方案可以获得较高的网络吞吐量,这是因为对链路分层类型和层速率的联合优化使得网络资源分配更合理化,充分考虑不同带宽的用户要求,并不局限为了照顾低带宽的信宿而忽视整体的吞吐量,从而可以进一步提高网络利用率。

在图 7(b)和图 7(c)中,35 个节点的网络的最大吞吐量并不比 25 个节点的网络最大吞吐量大,这是由于链路容量是随机选择的,所以网络的最大吞吐量不一定随着节点数的增加而增加,但是随着网络拓扑结构变得复杂,共享链路变多,寻优的迭代次数会随着网络的复杂度的增大而增加的;另外无论是遗传算子的初始基因、进化算子的初始信息还是萤火虫的初始位置都是随机生成的,所以在仿真图中本文方案所得到的初始吞吐量并不一定比文献[9]和文献[10]所得到的初始吞吐量大;在图 7(d)中,GA 在网络比较复杂时会出现寻优过程不稳定的情况,这是因为 GA 在维数比较高时经过多次运算后会出现求解速度很慢或者求解时的不稳定,

DE 在高维问题的处理方面虽然比 GA 优秀,但是求解速度也会随着进化次数的增加有所减慢。而 FA 在每次迭代中都使得萤火虫移动到更佳的位置,避免了交叉变异操作可能产生的退化情况,并且本文通过对 FA 的改进,使其在位置更新过程中具有更大的随机性,进一步地提高了算法的全局搜索能力

和寻优效果,因此获得了比 GA 和 DE 更少的寻优的迭代次数和更高的稳定性。

为了进一步验证算法的准确性,对上面的 15 个节点和 50 个节点的网络进行了 50 次的仿真实验,得到了每一代的平均网络吞吐量如图 8 所示。通过 2 个仿真图可以看出,无论是网络结构较简单还是

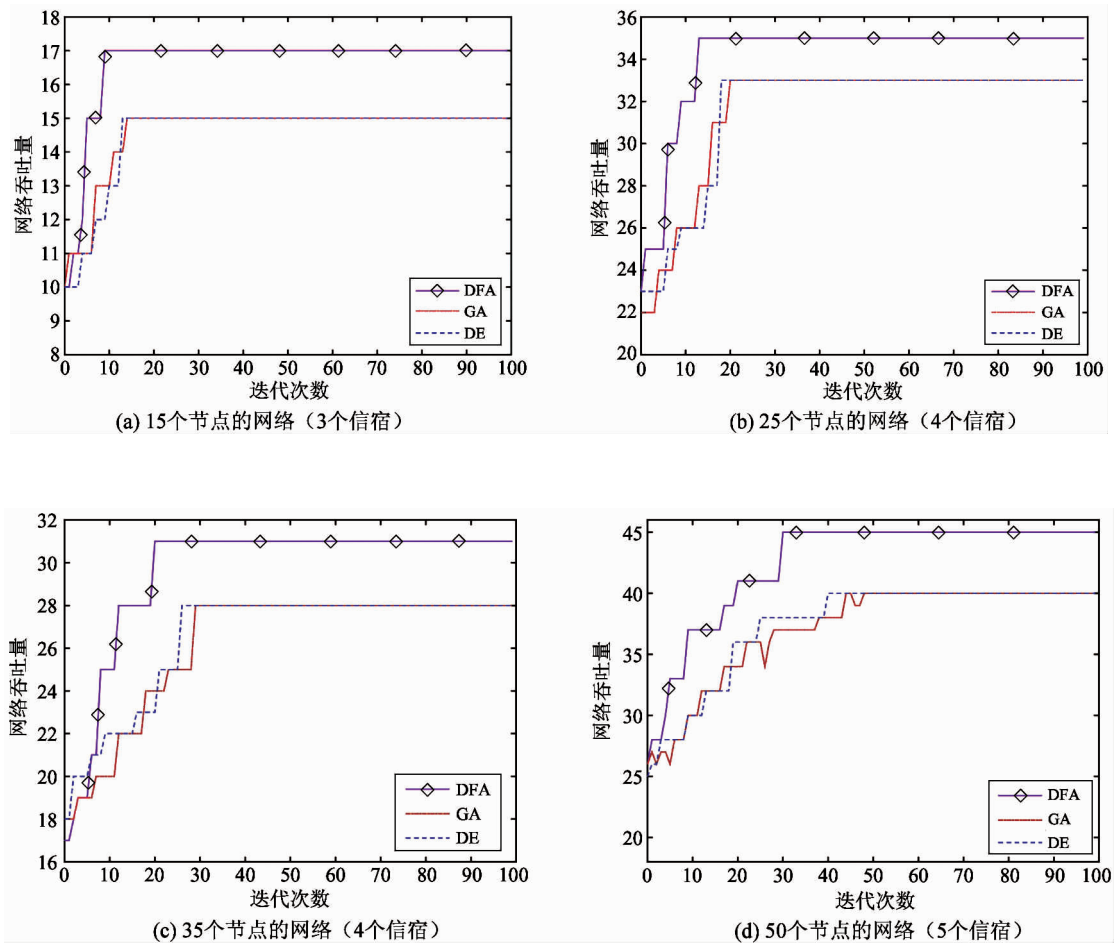


图 7 不同节点数的网络优化结果迭代图

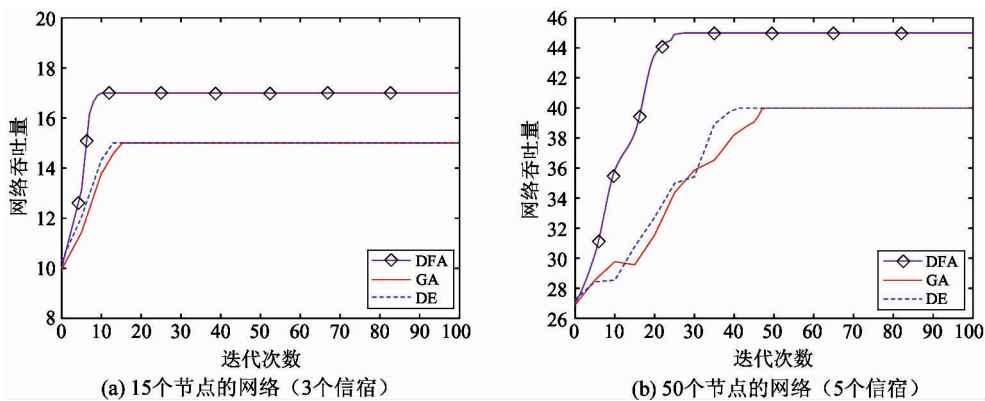


图 8 每一代的平均网络吞吐量进化图

较复杂的情况,基于 FA 的联合优化方案都能够以更少的迭代次数获得比基于 GA 和 DE 的仅优化链路分层类型的方案更高的网络吞吐量。

## 4 结 论

本文以单信源多信宿的网络为基础,讨论了为满足各信宿不同速率要求的分层网络编码方案,又分析了层间网络编码的数学模型,根据其特性设计了一种基于改进的 FA 的优化方案。通过对链路分层类型和层速率的优化分配,可以发现这两者对网络性能有着决定性的影响,两者的联合优化更是可以得到比优化单个对象更高的网络吞吐量;而对 FA 的离散处理和对其移动规则的改进,使得 FA 更适合搜索最优的分配方案。仿真结果表明,与基于 GA 和 DE 仅优化链路分层类型的层间网络编码优化方案相比,本文的方案可以以较少的迭代次数获得更高的网络吞吐量。

本文为萤火虫算法应用与分层网络编码的优化问题提供了一种新思路,所提出的对 FA 的离散化处理在对连续问题离散化方面具有一定的通用性。但是本文在整个优化过程中并未考虑中间节点丢包的情况,并且所处理的网络虽然是随机生成的,但是其路径均是已存在的路径,缺少动态处理的能力。如何设计出一种动态的考虑丢包情况的层间网络编码优化的分配方案是需要进一步研究的内容。

## 参考文献

- [ 1 ] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R, et al. Network information flow[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(4): 1204-1216
- [ 2 ] Li W. Overview of fine granularity scalability in MPEG-4 video standard[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology*, 2002, 11(3): 301-317
- [ 3 ] Zhao J, Yang F, Zhang Q, et al. LION: Layered overlay multicast with network coding[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2006, 8(5): 1021-1032
- [ 4 ] Zhang M, Zhang S, Liu W. On the optimal multi-rate throughput for multicast[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(1): 16-20
- [ 5 ] 林晓斌,许胤龙,詹成,等. 基于网络编码的分层媒体多播中的层速率分配优化[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(10): 2421-2428
- [ 6 ] 沈钦仁. 基于网络编码的多源光组播资源优化研究[D]. 重庆:重庆邮电大学通信与信息工程学院,2016. 46-49
- [ 7 ] 张祖凡,罗利莎,张宇. 基于用户簇的层速率分配优化算法[J]. *中国科学:信息科学*, 2017, 47(1): 114-126
- [ 8 ] Si J J, Zhuang B J, Cai A N. Optimization of layered multicast with network coding and genetic algorithm[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2009, 16(3): 52-58
- [ 9 ] 司菁菁,孙明明,程银波. 基于遗传算法的层间等级网络编码优化[J]. *高技术通讯*, 2014, 24(7): 690-695
- [ 10 ] 司菁菁,程银波,孙明明. 基于微分进化算法的层间等级网络编码优化[J]. *燕山大学学报*, 2014, 38(4): 340-347
- [ 11 ] Yang X S. Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimization[J]. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2010, 2(2): 78-84
- [ 12 ] 秦煜森,胡凌,青志明,等. 基于萤火虫算法的电网节点编号优化[J]. *重庆理工大学学报:自然科学*, 2017, 31(11): 198-203
- [ 13 ] 段少楠,戴胜华. 离散萤火虫算法在高速列车运行调整中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2017, 0(0): doi:10.3778/j.issn.1002-8331.1703-0231
- [ 14 ] 李明富,马建华,张玉彦,等. 基于离散萤火虫算法的自由曲面测量序列规划[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(11): 2719-2727
- [ 15 ] Yang X S. Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms[M]. Beckington: Luniver Press, 2010. 83-84
- [ 16 ] Sui Y B, Yi L Z, Yu W X. A novel and improved firefly algorithm based on two-order oscillation[J]. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2017, 9(5): 19-26

# Inter-session network coding optimization based on firefly algorithm

Hu Yangtianxiu, Meng Limin, Jiang Wei, Jiang Peirui, Shang Yuzhou

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

## Abstract

In heterogeneous networks, the layered network coding can not only solve the different receiving rate requirements of the sinks, but also improve the network throughput. The inter-session network coding can obtain higher bandwidth utilization than intra-session network coding. Therefore, optimization of inter-session network coding is a key issue for improving network performance. Based on the single-source multi-sink network, this paper analyzes the mathematical programming of the inter-session network coding model, and then optimizes the layered type of links and layer rate with the search capability of the improved firefly algorithm (FA). In this way, the network throughput is improved. Simulation results show that compared with the algorithms that only optimize the layered type of links, this optimization algorithm can achieve optimization and higher throughput with less iterations.

**Key words:** heterogeneous networks, layered network coding, network throughput, inter-session network coding, firefly algorithm(FA)