

基于多目标遗传算法优化弹性光网络的多路径保护机制

刘焕淋^{*①} 李瑞艳^① 孔德谦^① 陈勇^②

^①(重庆邮电大学光纤通信技术与网络重点实验室 重庆 400065)

^②(重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065)

摘要: 弹性光网络中多路径的保护方案相比单路径有效地降低网络带宽阻塞率,但会导致接收端多径时延差的问题,且业务的多路径分割传输策略使用了光网络较多的频谱资源。该文基于多目标遗传算法提出了遗传多路径保护算法(Genetic Multipath Protection Algorithm, GMPA),解决多路径时延差和节约频谱资源问题。在GMPA算法中,根据业务请求在光网络中建立 K 条边分离最短路径和带宽分配方案作为GMPA算法的初始种群,设计了一种联合考虑传输时延差和带宽资源分配的向量函数优化种群分类和拥挤距离排序。为提高算法的搜索能力和收敛速度,算法在交叉操作中设计个体自交叉方式,在变异过程中设置了带宽基因位变异范围及约束条件。仿真结果表明,相比多路径保护(Multiple Path Protection, MPP)算法和工作路径首次分配保护路径最后分配(Primary First-fit Modified Backup Last-fit, PF-MBL)算法,GMPA算法获得最低的带宽阻塞率,其频谱资源利用率接近最优的MPP算法,路径间距离差异性能优于MPP算法。

关键词: 弹性光网络; 遗传多路径保护算法; 路径间距离差异

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)09-2261-07

DOI: 10.11999/JEIT151384

Optimization Survivable Multipath Provisioning Based on Multi-objectives Genetic Algorithm for Elastic Optical Networks

LIU Huanlin^① LI Ruiyan^① KONG Deqian^① CHEN Yong^②

^①(Key Laboratory of Optical Communications and Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Multipath provisioning algorithm outperforms single-path provisioning algorithm in terms of bandwidth blocking probability. However, multipath transmission causes the differential delay among different paths and affects the usage of spectrum resources. To address the problem, a Genetic Multipath Protection Algorithm (GMPA) is proposed based on multi-objectives genetic algorithm. according to traffic requests, the K link-disjoined paths and bandwidth assignments are designed as the population initialization scheme. A vector function is proposed to balance the path-distance difference and network spectrum resources by optimizing population classification and crowding distance sorting. An individual self-cross pattern is introduced and the variation range and constraint conditions of bandwidth gene are designed to improve the algorithm search ability and convergence. Compared with the Multiple Path Protection (MPP) and Primary First-fit Modified Backup Last-fit (PF-MBL), simulation results show that the proposed GMPA algorithm can get lowest bandwidth blocking probability, its spectrum resource utilization is close to the optimal MPP, and the path-distance difference of GMPA is better than that of MPP.

Key words: Elastic Optical Networks (EONs); Genetic Multipath Protection Algorithm (GMPA); Path-distance difference

1 引言

传统的波分复用网络(Wavelength Division

Multiplexing, WDM)采用固定波长带宽的分配方式。当业务需求小于一个波长容量时,将导致资源浪费^[1,2]。因此,频谱效率更高、更灵活的弹性光网络(Elastic Optical Networks, EONs)应运而生。EONs 能根据业务的带宽需求灵活配置频谱资源,实现 Gbit/s 级至 Tbit/s 级间的带宽灵活配置。EONs 被广泛地认为是下一代光网络发展的主要方向之一^[3]。

影响 EONs 性能的一个重要因素是路由和频谱

收稿日期: 2015-12-08; 改回日期: 2016-05-13; 网络出版: 2016-07-04

*通信作者: 刘焕淋 liuhl2@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(61275077, 61571072), 重庆市教委自然科学基金(KJ1140421), 重庆市科委自然科学基金(2015jcyjA40024)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61275077, 61571072), The Scientific Research Fund of Chongqing Municipal Commission (KJ1140421), The Basic and Frontier Research Program of Chongqing (2015jcyjA40024)

分配问题 (Routing and Spectrum Assignment, RSA)。文献[4]设计了一个以最小化网络频谱资源为目标, 频谱连续性和一致性为约束的静态 RSA 整数线性规划模型。文献[5]设计了动态 RSA 算法, 实现了网络中动态业务的灵活配置。在对动态业务进行频谱分配过程中, 频谱资源的动态分配和释放会引发频谱碎片问题。文献[6]提出了工作路径首次分配、保护路径最后分配 (Primary First-fit Modified Backup Last-fit, PF-MBL) 算法解决频谱分配过程中的碎片问题及处理方法。然而, 由于在频谱分配时频谱连续性和一致性的约束, 单路径路由和频谱分配难以传输大带宽的业务, 导致较高的业务阻塞率^[7]。文献[8]表明对业务采用多路径传输相比单路径传输有效地降低网络的阻塞率。

随着单光纤提供的带宽达到 400 Gb/s 甚至 1 Tb/s 以上, 大容量光纤线路故障将导致大量的数据业务丢失, 对网络性能影响将是灾难性的, 因此, 光网络的生存性路径问题变得至关重要。文献[9]研究了弹性光网络中静态多路径保护问题, 为最小最大化网络消耗的频谱索引值提出多路径保护启发式算法, 相比于传统的单路径保护算法, 多路径保护算法具有较高的频谱利用率。文献[10]针对弹性光网络中动态多路径保护问题, 提出了动态多路径保护 (Multiple Path Protection, MPP) 算法, MPP 算法通过优化多条路径上频谱资源的分配传输业务, 降低了网络带宽阻塞率, 但 MPP 算法忽略了多路径传输对接收端产生的时延差问题。由于多路径路由产生的时延差将导致目的节点需要配置额外的缓冲区对业务进行缓存排序接收^[11]。随着互联网应用发展, 涌现了大量的视频类数据应用, 这些新的数据应用需要较多传输带宽资源保证且对时延也更加敏感。因此, 弹性光网络多路径保护的时延差问题急需解决。文献[12]研究了同步光纤网 (Synchronous Optical Network, SONET) 时延约束下多路径保护问题, 当业务到达网络时, 把业务分成 N 份小粒度的业务在 N 条边分离的路径上进行传输, $N-1$ 条路径满足业务带宽的需求, 其中剩余一条路径上分配的带宽满足 $N-1$ 条路径上分配带宽的最大值, 并指出此问题是一个 NP 难解问题。同时, 在多路径传输的业务带宽分配中, 业务带宽的多径分割策略也是一个重要的研究问题, 不同的带宽分割策略会影响光网络资源的带宽使用情况。而且, 在弹性光网络的路由和频谱分配时需要考虑频谱连续性和一致性约束, 增加了多径传输路由和频谱分配的难度。因此, 研究弹性光网络中动态多路径保护配置的时延问题, 相比于 SONET 网络将更加

复杂。很多研究证明, 智能优化算法是解决此类 NP 难解问题的一种有效方法。

本文采用多目标遗传算法解决考虑时延差的多路径保护路由和频谱分配问题。根据业务请求, 选择 K 条最短边分离路径和业务带宽设计种群初始化方案, 依据路径时延差和网络资源设计优化向量函数, 通过个体的优化向量函数值对业务进行等级分类和拥挤距离排序, 最终得到多条传输路径间时延差较小并且网络资源较少的多路径保护的路由和频谱分配方案。

2 多路径保护配置的模型

设弹性光网络的网络拓扑用有向无环图 $G(V, E, S)$ 表示, 其中 V 表示节点集合, E 表示链路集合, S 表示每条链路上的频隙集合。网络中的业务请求 $r=(s, d)$, s 为源节点, d 为目的节点。 B_r 表示业务 r 的请求带宽。 $B_{r,i}$ 表示业务 r 的第 i 条路径中需要的带宽。 N 表示业务 r 所需要的 N 条边分离路径。 $l_{r,i}$ 表示业务 r 第 i 条路径经过的链路数目。本文把业务 r 所需要的频谱资源 W 最小和业务 r 最长路径和最短路径的差值 LT 最小化设置为生存性多路径配置的优化目标, 建立了如式(1)所示的优化模型:

$$\left. \begin{aligned} \min W &= \sum_{i=1}^N B_{r,i} \times l_{r,i} + g \times N \\ \min LT &= \max(L_{r,1} \cdots L_{r,N}) - \min(L_{r,1} \cdots L_{r,N}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^N B_{r,i} - q_r \geq B_r + G \times N, N \in [3, K] \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N B_{e,s}^{r,i} = 1, \forall s \in S, \forall e \in E, N \in [3, K] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} B_{e,s}^{r,i} &= B_{f,s}^{r,i}, \forall e \in E, \forall r \in R, \forall s \in S, \\ &\forall f \in E, \forall i \in N, e \neq f \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} (B_{e,s}^{r,i} - B_{e,s+1}^{r,i} - 1) * (B_r) &\geq \sum_{s_1 \in (s+2, S)} B_{e,s_1}^{r,i}, \\ N \in [3, K], \forall s \in S, \forall r \in R, \forall i \in N \end{aligned} \quad (5)$$

g, q_r 分别为业务之间保护带宽的需求和业务 r 所有传输路径中最大的带宽需求; $L_{r,i}$ 表示业务 r 第 i 条路径的物理距离; $B_{e,s}^{r,i}$ 为二进制变量, 业务 r 第 i 条路径占用链路 e 上的频隙 s 时取值为 1, 否则为 0; K 为应用最短路径算法为业务找到 K 条最短边分离路径。式(2)约束了在单链路故障下, 为保证业务传输, 业务的路径带宽需求。式(3)表明业务 r 的 N 条路径为链路不相交的路径。式(4)约束业务在频谱分配时要满足频谱一致性约束。式(5)约束业务在频谱分配时要满足频谱连续性约束。

则多路径保护的配置优化问题的优化向量函数

为

$$\min(\mathbf{F}) = \min(W, LT)^T \quad (6)$$

3 基于多目标遗传算法的多路径保护机制

弹性光网络中多路径保护的路由和频谱分配问题是一个 NP 难问题^[9]。为解决此问题,本文基于多目标非支配排序的遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II)设计了一种遗传多路径保护算法(Genetic Multipath Protection Algorithm, GMPA)。GMPA 算法首先,设计了初始化种群方案产生初始种群,非支配排序后通过选择策略、个体自交叉和带宽基因位的变异操作得到第 1 代子种群;其次,从第 2 代开始,合并父代种群和子代种群并进行非支配排序。同时,计算每个非支配等级中个体的拥挤距离,根据非支配关系与个体的拥挤距离进行个体选择,作为新的父代种群;最后,通过个体自交叉和带宽基因位的变异产生新的子代种群;依次类推,最终产生一组 Pareto 最优解。从而得到弹性光网络多路径保护的路由和频谱分配的解决方案。

3.1 初始化种群设计

在种群初始化方案中,种群规模的大小和 N 密切相关。文献[7]指出:为了减少网络频谱资源的使用, N 的取值至少为 3,当 N 条路径可以满足业务传输需求时,随着 N 值的增大,虽然业务所需的频谱资源不变,但是,路径增加导致保护频谱资源的需求增多。因此,分配的频谱资源可以满足业务传输需求时,就不再增加 N 值。

在 GMPA 算法中,采用基于不定长十进制的编码方式构造初始个体。根据光网络拓扑为每个业务请求的源节点到目的节点计算 K 条边分离路径,并把可以产生潜在可行解的 N 条边分离路径组合形成一个个体。文献[13]表明在不考虑每条路径的光路长度时,每条路径分配的带宽为 B_r/N ;若考虑路径

的光路长度,这种分配方案不能最小化网络资源使用情况,每条路径分配的带宽可在 B_r/N 左右寻找到最优解。为此本文在种群初始化方案中为每个个体,即 N 条边分离路径中的最后一位设计了一个带宽基因位。则种群初始化方案即从 K 条边分离最短路径中选取 C_K^N 组边分离的路径组合和设计的带宽基因位构造种群。为了更清楚理解 GMPA 算法种群的初始化方案,采用图 1 的网络拓扑进行举例说明。

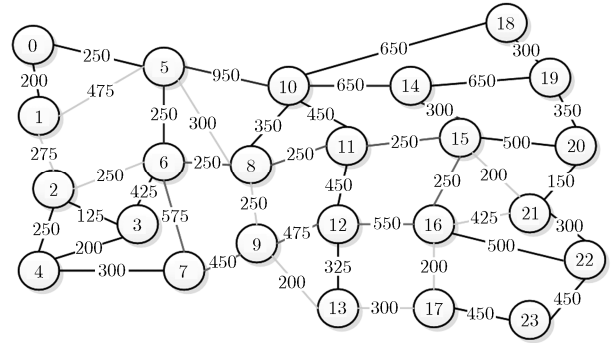


图 1 USNET 网络拓扑(km)

假设请求传输的业务 $r(6, 15)$ 需要从节点 6 到目的节点 15,首先采用最短路径算法为该业务计算 K 条边分离最短路径,分别为 6-8-11-15, 6-5-10-14-15, 6-7-9-12-16-15, 6-2-1-5-8-9-13-17-16-21-15, 这里 $K=4$ 。若 N 取值为 3,利用 K 条边分离最短路径构造 GMPA 算法的一种初始化种群如图 2 所示。

3.2 精英策略的选择机制

精英策略的选择机制即从父代中选取优良个体进入子代,它是遗传算法以概率 1 收敛的必要条件。在 GMPA 算法的选择过程中,精英策略的选择机制主要由下面的步骤组成:

步骤 1 将父代个体和子代个体合并成一个种群,并依据优化向量函数式(6)计算种群中每个个体的优化向量函数值。

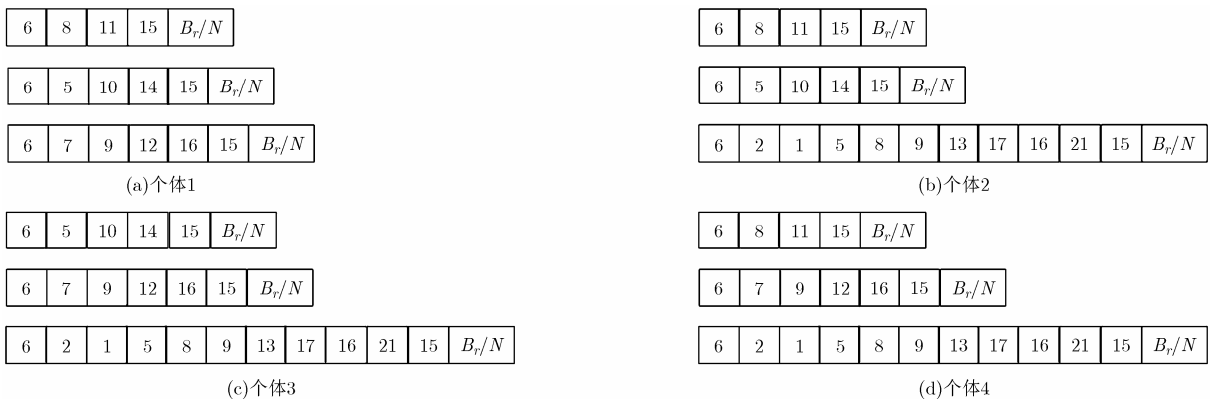


图 2 种群初始化方案($K=4, N=3$)

步骤 2 依据优化向量函数值对种群中的个体进行等级分类和拥挤距离排序。

步骤 3 从种群中随机选择两个个体。判断两个个体是否属于同一等级。若是，则选择出等级最低的个体；否则，选出拥挤距离最大的个体。

步骤 4 判断是否从种群中找到了 C_K^N 个个体。若是，则算法结束；否则，转至步骤 3。

3.3 个体自交叉和带宽基因位的变异

为改进种群多样性，在 GMPA 算法的交叉操作中设计了一种个体自交叉方式以便产生新的可行个体，即对个体中表示路径的基因位对应相同网络节点处进行交叉操作。如图 2，个体 2 的第 2 条路径和第 3 条路径有相同节点 5，则在此基因位进行交叉产生一个新的个体，具体操作如图 3 所示。

GMPA 算法中，对个体中表示带宽的基因位进行变异操作可以产生新的可行解。为产生较优的带宽分配方案，对个体中表示带宽的基因位以固定概率进行变异。同时，为提高收敛速度和考虑弹性光网络频谱分配情况，GMPA 算法的变异带宽至少是一个频隙带宽 Δs ，则变异空间为 $(B_r / N - k \times \Delta s, \dots, B_r / N - \Delta s, B_r / N, B_r / N + \Delta s, \dots, B_r / N + k \times \Delta s)$ 。为满足业务的传输保护频带需求，在 N 条路径中随机选取两条路径 i, j 不进行变异，对剩余 $N-2$ 条路径 $\{k_1, k_2, \dots, k_{N-2}\}$ 进行变异。在考虑式(2)带宽约束的条件下，随机选取路径 j 为保护路径，则 i, j 两条路径的带宽分配需求要满足式(7)，式(8)条件：

$$B_{r,i} = B_r - \sum_{k=k_1}^{k_{N-2}} B_{r,k} \quad (7)$$

$$B_{r,j} = \max(B_i, B_{k_1}, B_{k_2}, \dots, B_{k_{N-2}}) \quad (8)$$

以个体 2 为例说明 GMPA 算法的变异操作，假设对个体 2 的第 1 条路径的带宽基因位进行变异，则变异后的结果如图 4 所示。

3.4 GMPA 算法具体流程

输入：弹性光网络的网络拓扑 $G(V, E, S)$ 、交叉概率 p_c 、变异概率 p_m 、最大迭代次数 nsize。

输出：弹性光网络多路径保护的路由和频谱分配方案。

步骤 1 等待网络中业务请求到达。如果有业务请求到达，转至步骤 2；否则，更新网络状态。

步骤 2 使用最短路径算法为业务计算工作路径。并采用首次命中算法为工作路径分配频谱资源。若上述操作成功执行，转至步骤 3；否则，转至步骤 4。

步骤 3 使用最短路径算法为业务计算一条保护路径。并采用首次命中算法为保护路径分配频谱资源。若上述操作成功执行，转至步骤 1；否则，转至步骤 4。

步骤 4 为业务计算前 K 条最短边分离路径，且初始化 $N=3$ 。

步骤 5 判断 N 是否小于等于 K 。若是，根据此 K 条边分离的最短路径构造一个规模为 C_K^N 的第 t 代的父代种群 $P_t, t=0$ ，并初始化第 t 代的子代种群 $Q_t = \emptyset$ ；否则，阻塞此业务，转至步骤 1。

步骤 6 将 P_t 和 Q_t 的个体合并放入 U_t 中，并根据优化向量函数式(6)，计算 U_t 中个体的优化向量函数值。

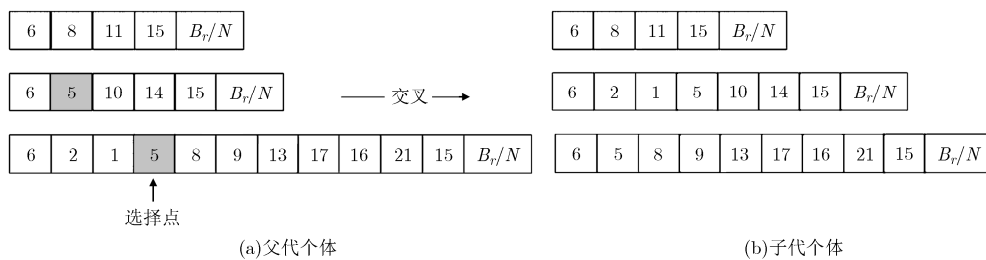


图 3 个体 2 的自交叉操作产生新个体示意图

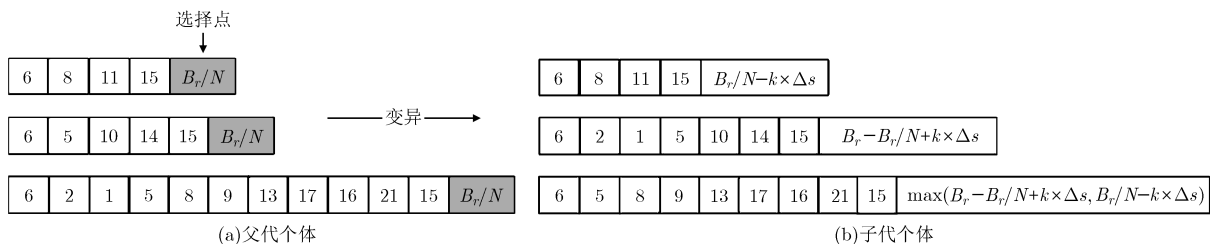


图 4 个体 2 的带宽基因位变异过程

步骤 7 根据非支配集排序方法对 U_t 中的个体进行等级分类，并对同一等级中的个体进行拥挤距离排序。

步骤 8 设置 $P_{t+1} = \emptyset$ ，用精英选择机制从 U_t 中选择 C_K^N 个个体放入 P_{t+1} 中。

步骤 9 依据个体自交叉和带宽基因位的变异策略对 P_{t+1} 中的个体进行交叉和变异操作，产生子代种群 Q_{t+1} ， $t=t+1$ 。

步骤 10 判断 t 是否小于迭代次数 $nsize$ ，若是则转至步骤 11；否则，转至步骤 6。

步骤 11 输出 P_t 和 Q_t 非支配解的一个个体，依据个体带宽基因位的带宽对个体中的路径用首次命中算法进行频谱分配。若个体中的 N 条路径频谱分配都成功，则转至步骤 1；否则， $N=N+1$ ，并转至步骤 5。

对于 GMPA 算法，主要由 3 个步骤组成， K 条边分离路径的计算、NSGA-II 算法对路径的优化和频谱分配过程；基于 Dijkstra 最短路径算法计算 K 条边分离路径的时间复杂度为 $O(KV \lg V)$ ；用 NSGA-II 算法对路径进行优化的时间复杂度主要取决于优化目标数目和种群规模大小，时间复杂度为 $O(2(C_K^N)^2)^{[14]}$ ；频谱分配过程中主要查询业务路径经过的链路上的空闲频隙，然后进行资源分配，则时间复杂度为 $O(NSE')$ ，其中 E' 为业务路径经过的链路数目；经上述分析 GMPA 总的时间复杂度为 $O(KV \lg V + NSE' + 2(C_K^N)^2)$ 。

4 算法仿真结果分析

4.1 仿真参数设置

为了验证算法的性能，本文将 GMPA 算法分别与 PF-MBL 算法^[6]MPP 算法^[10]进行了带宽阻塞率，资源利用率和路径距离差的性能仿真。仿真中使用的分别是 24 个节点 43 条链路的 USNET 网络和 14 个节点 21 条链路的 NSFNET 网络，分别如图 1 和图 5 所示。仿真时假设业务请求到达服从参数为 λ 的泊松分布，业务的源-目的节点服从均匀分布，业务的持续时间服从参数为 $1/\mu$ 的指数分布。每根光纤总频隙宽度为 4.47 THz，频隙宽度为 12.5 GHz，

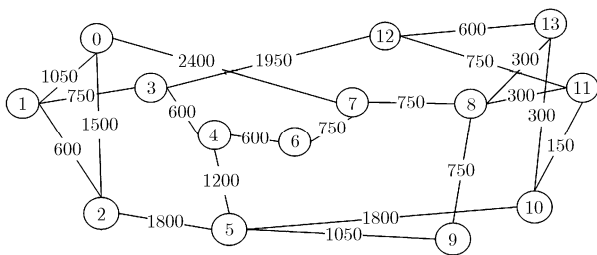


图 5 NSFNET 网络拓扑(km)

因而每根光纤有 358 个频隙。网络中的业务从 {10 Gbps, 40 Gbps, 100 Gbps} 随机产生。仿真中设置的基本参数：交叉概率为 $p_c=0.8$ ，变异概率 $p_m=0.005$ ，最大迭代次数 $nsize=100$ ^[15]。

4.2 仿真结果分析

图 6 和图 7 分别显示了 3 种算法在两种网络场景中随负载变化时带宽阻塞率的变化情况。可以看出，3 种算法的带宽阻塞率都随着负载的增加而增加。但在相同的负载情况下，MPP 算法相比于 PF-MBL 算法具有更低的带宽阻塞率，且 GMPA 算法获得的带宽阻塞率最低。这充分表明了多路径保护机制在业务传输时，由于把业务分割为多个小粒度的业务进行多路径传输，相比单路径传输，可以明显地降低业务的带宽阻塞率。而本文提出的 GMPA 算法带宽阻塞率更低于 MPP 算法，这主要因为 GMPA 算法在业务传输时优化了业务带宽的分割策略，通过对带宽基因位的变异操作，找到占用网络频谱资源较少的多路径带宽分配方案。相比图 6，图 7 所示各算法的带宽阻塞率在相同负载下比图 6 所示数值都低一些，这是由于业务在节点和路径更多的 USNET 网络中传输时，源到目的节点所需路径的平均跳数较少。由于频谱分配需要满足频谱一致性和连续性约束，业务传输路径的平均跳数越少，越容易被成功传输。

图 8 和图 9 分析了 3 种路径保护算法在两种网络环境下对频谱资源利用率的影响。频谱资源利用率为传输业务需要的带宽资源与网络中总的带宽资源比值。图 8 和图 9 都表明 MPP 算法和 GMPA 算法相比于 PF-MBL 算法频谱资源利用率提升了，主要原因是在相同负载下 PF-MBL 算法阻塞了更多的业务不能有效地利用网络资源。此外 MPP 算法的频谱利用率高于 GMPA 算法，这是因为 GMPA 算法在个体的基因位构造中设置了带宽基因位，并基于网络资源设置了优化向量函数，在算法遗传阶段通过对个体的等级分类和拥挤距离排序可以找到占用网络带宽资源少的路由和频谱分配方案，因此，在传输相同业务时，GMPA 算法比 MPP 算法占用更少的频谱带宽资源。相比图 8，图 9 所示各算法的频谱资源利用率比图 8 所示的指标低一些，这是由于业务在连通度较高的 USNET 网络中传输时，为源节点到目的节点找到的边分离路径数目较多，找到跳数更少的传输路径概率较大，因此在 USNET 网络中传输相同业务时需要消耗的频谱资源少一些，从而节约了网络频谱资源。

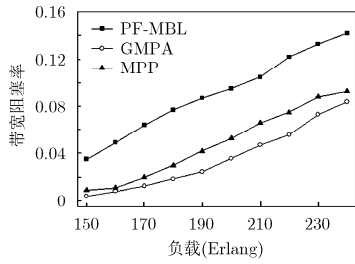


图 6 NSFNET 网络中不同负载下带宽阻塞率的对比

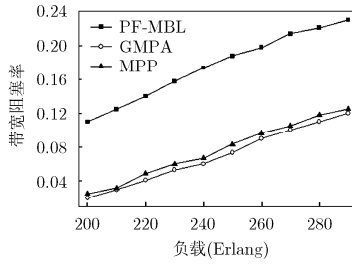


图 7 USNET 网络不同负载下带宽阻塞率的对比

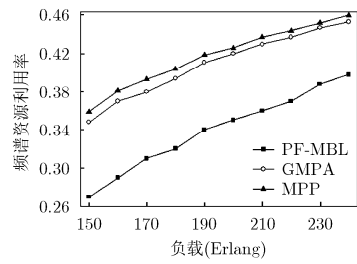


图 8 NSFNET 网络中不同负载下频谱资源利用率的对比

图 10 和图 11 表明了 GMPA 算法和 MPP 算法路径距离差异性能。路径距离差异是平均每个业务的最长路径和最短路径距离的差值，差值大小对业务的接收端多路径时延差影响较大。由于 PF-MBL 算法是单路径保护策略不存在路径间时延差问题，因此，这里性能对比仅针对 GMPA 算法和 MPP 算法进行了路径距离差异性能的比较。在 NSFNET 和 USNET 网络中，GMPA 算法路径距离差异性能明显优于 MPP 算法，这表明 GMPA 算法在基于前 K 条边分离最短路径设置的种群初始化方案，经过个体路径基因位的自交叉操作，可以找到满足带宽的多路径传输方案；同时，GMPA 算法基于优化向量函数的等级分类和拥挤距离排序，能从众多的多路径组合方案中找到路径距离差异较小的路由方案。相比图 10，图 11 所示 MPP 算法和 GMPA 算法在 USNET 网络中比在 NSFNET 网络中仿真得到的路径时延差性能较好一些，原因是 NSFNET 连通度较低，使业务的平均最短路径和次短路径距离差距较大。

5 结束语

本文研究了弹性光网络中生存性保障的多路径路由和频谱分配问题，基于 NSGA-II 多目标遗传算法，提出了遗传多路径保护算法 GMPA，解决弹性光网络多路径时延差过大的问题，同时节约了网络频谱资源。GMPA 算法使用智能优化算法思想，设计了一种有效的个体基因位组合方式，通过带宽基因位的变异、自交叉操作方式和精英保留策略，能有效地找到满足生存性多路径传输时延差较小和带宽分配较优的多路径传输和频谱带宽分配方案。随着光网络的发展，将软件定义网络(Software Defined Networking, SDN)通过集中控制器直接提供流交换的思想引入光网络中，减小光网络数据转发中的配置时间，在有效降低业务恢复所需传输时延同时，以进一步有效地减少用户端到端传输时延满足时延敏感类业务的恢复时间，对推动新的数据业务在未来光网络中应用和性能保证至关重要。

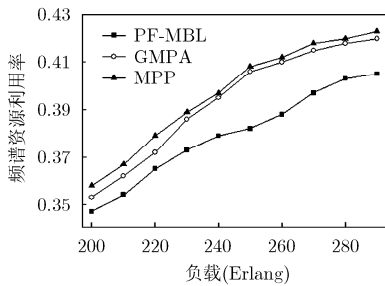


图 9 USNET 网络不同负载下频谱资源利用率的对比

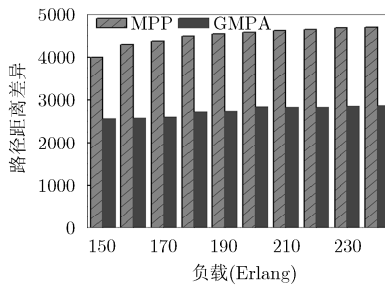


图 10 NSFNET 网络中不同负载下路径距离差异的对比

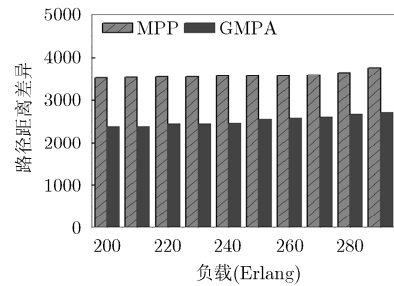


图 11 USNET 网络不同负载下路径距离差异的对比

参考文献

[1] ZHOU H, MAO S, and AGRAWAL P. Optical power allocation for adaptive transmissions in wavelength-division multiplexing free space optical networks[J]. *Digital Communications and Networks*, 2015, 1(3): 171-180. doi: 10.1016/j.dcan.2015.09.004.

[2] 刘焕淋, 方强, 雷芳. WDM 光网络中多播业务量疏导方法分析[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学)*, 2012, 24(3): 269-277.

[3] 刘焕淋, 岁蒙, 徐一帆, 等. 基于距离自适应和有效共享路径感知的光疏导方法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(8): doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2012.03.001.

LIU Huanlin, FANG Qiang, and LEI Fang. Analysis of multicast traffic grooming algorithms in WDM mesh networks [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition)*, 2012, 24(3): 269-277. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2012.03.001.

- 1955-1970. doi: 10.11999/JEIT141442.
- LIU Huanlin, SUI Meng, XU Yifan, *et al.* A method of optical grooming for distance-adaptive and effective sharing path-aware[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1955-1970. doi: 10.11999/JEIT141442.
- [4] SHEN G, WEI Y, and BOSE S K. Optimal design for shared backup path protected elastic optical networks under single-link failure[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2014, 6(7): 649-659. doi: 10.1109/JOCN.2014.6850206.
- [5] WAN X, HUA N, and ZHENG X. Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2012, 4(8): 603-613. doi: 10.1364/JOCN.4.000603.
- [6] TARHAN A and CAVDAR C. Shared path protection for distance adaptive elastic optical networks under dynamic traffic [C]. *Reliable Networks Design and Modeling (RNDM)*, Almaty, 2013: 62-67. doi: 10.1109/ICUMT.2013.6798405.
- [7] WANG X, KUANG K X, WANG S, *et al.* Dynamic routing and spectrum allocation in EONs with mixed line rates[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2014, 6(12): 1115-1127. doi: 10.1109/JOCN.2014.6985903.
- [8] ZHU Z, LU W, ZHANG L, *et al.* Dynamic service provisioning in elastic optical networks with hybrid single-multi-path routing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(1): 15-22. doi: 10.1109/JLT.2012.2227683.
- [9] XIAO N and RUAN L. Survivable multipath provisioning in OFDM-based flexible optical networks[C]. *Globecom Workshops*, Anaheim, 2012: 346-351. doi: 10.1109/GLOCOMW.2012.6477595.
- [10] RUAN L and ZHENG Y. Dynamic survivable multipath routing and spectrum allocation in OFDM-based flexible optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2014, 6(1): 77-85. doi: 10.1364/JOCN.6.000077.
- [11] LU W, ZHOU X, GONG L, *et al.* Dynamic multi-path service provisioning under differential delay constraint in elastic optical networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(1): 158-161. doi: 10.1109/LCOMM.2012.120612.121343.
- [12] HUANG S, MARTEL C U, and Mukherjee B. Survivable multipath provisioning with differential delay constraint in telecom mesh networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19(3): 657-669. doi: 10.1109/TNET.2010.2082560.
- [13] 尹珊. 灵活光网络中的资源优化[D]. [博士论文], 北京邮电大学, 2014.
- YIN Shan. Resource optimization in flexible optical WDM networks[D]. [Ph.D. dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [14] 申晓宁, 李涛, 张敏. 一种基于模糊逻辑引入偏好信息的多目标遗传算法[J]. *南京理工大学学报*, 2011, 32(2): 245-250. doi: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2011.02.015.
- SHEN Xiaoning, LI Tao, and ZHANG Min. Multi-objective optimization genetic algorithm incorporating preference information based on fuzzy logic[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2011, 32(2): 245-250. doi: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2011.02.015.
- [15] 张宇, 李国建, 史彬. 非支配排序进化策略求解煤气化多目标优化问题[J]. *化工学报*, 2013, 64(12): 4628-4633.
- ZHANG Yu, LI Guojian, and SHI Bin. Multi-objective optimization of coal gasifier using NSES[J]. *CIESC Journal*, 2013, 64(12): 4628-4633.
- 刘焕淋: 女, 1970年生, 教授, 研究方向为光通信技术与业未来网络.
- 李瑞艳, 女, 1989年生, 硕士, 研究方向为弹性光网络生存性路由和频谱分配算法.
- 孔德谦, 男, 1995年生, 本科生, 研究方向为光网络与通信技术.
- 陈勇, 男, 1963年生, 教授, 研究方向为光通信技术、传感检测与自动化技术.