



光通信技术

Optical Communication Technology

ISSN 1002-5561, CN 45-1160/TN

《光通信技术》网络首发论文

题目：弹性光网络中结合预测的多维感知 RSA 算法
作者：徐凯，宣涵，陆煜斌，王炎豪，朱嘉豪，沈建华
网络首发日期：2020-10-20
引用格式：徐凯，宣涵，陆煜斌，王炎豪，朱嘉豪，沈建华. 弹性光网络中结合预测的多维感知 RSA 算法. 光通信技术.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1160.TN.20201019.1646.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

弹性光网络中结合预测的多维感知 RSA 算法

徐 凯，宣 涵，陆煜斌，王炎豪，朱嘉豪，沈建华*

（南京邮电大学 通信与信息工程学院，南京 210003）

摘要：弹性光网络中的传统路由频谱分配算法多考虑路由跳数或频谱资源占用情况，缺乏时域与相邻链路的信息有效利用。本文提出一种结合预测的多维感知 RSA 算法，针对持续时间已知业务的历史时间信息通过后向传播神经网络预测未来业务的时间信息，在路由时综合考虑时间、频谱和相邻链路资源占用程度。理论分析和仿真结果表明多维感知 RSA 算法相比传统 RSA 算法能有效降低带宽阻塞率。

关键词：弹性光网络；路由和频谱分配；后向传播神经网络；多维感知

A Multi-Dimension-Aware Routing and Spectrum Assignment Algorithm Combined With Prediction In Elastic Optical Networks

XU Kai, XUAN Han, LU Yubin, WANG Yanhao, ZHU Jiahao, SHEN Jianhua

（School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications (NJUPT), Nanjing 210003, China）

Abstract: The traditional RSA algorithms in EON mostly consider the number of routing hops or the occupancy spectrum resource, and lack the effective use of information in time dimension and adjacent links. A Multi-domain-aware (MDA) RSA algorithm combined with prediction is proposed in this paper. The time information of historical services are used to forecast the time information of coming services through a back propagation neural network. The resource occupancy of spectrum and adjacent links combined with the prediction result is considered when routing. Simulation results show that MDA can ameliorate the bandwidth blocking probability compared with traditional RSA algorithm.

Key words: EON; RSA; back propagation neural networks; multi-dimensionsal awareness

0 引言

根据权威机构预测^[1]，2022 年全球将会有大于 120 亿个终端接入移动网络，届时网络流量将会是 2017 年的 4 倍，大幅增长的流量给光网络带来了巨大挑战。传统的波分复用光网络扩展性差、传输效率低，已经不能满足新型网络应用的需求^[2]。为了解决这一问题，学术界提出了具有更小颗粒度——频隙（FS）的弹性光网络（EON）。EON 在承载业务时，根据业务需求的带宽灵活地分配频隙资源，与传统光网络相比能有效提升传输效率^[3]。在光网络中为业务选路并分配频隙资源（RSA）是 EON 的基础，传统的 RSA 算法主要考虑的是网络当前的状态信息并进行资源分配的优化，而对业务的历史信息或特征并不关注。近年来，许多具有已知业务持续时间特点的新型应用在 EON 中得到广泛使用，如数据迁移、边缘计算等^[4]。若对这类业务的时间信息加以利用，可以改进 RSA 算法，改善网络性能，如文献^[5,6]均利用业务持续时间信息设计出了更高效的路由算法和节能策略。

学术界针对光网络中 RSA 问题已经开展了一些研究^[6-11]。文献^[8-10]提出在选路阶段综合考虑频域资源使用情况（如可用频谱状态、频谱碎片化程度和路径长度等）以优化求解 RSA 问题，但没有考虑业务的时间信息。文献^[7,11]采用预测技术解决 EON 中的 RSA 问题，在选路时考虑了业务的时间信息，但没有考虑到候选路径相邻链路的频谱资源使用情况。文献^[6]在选路时考虑了业务持续时间、资源利用率及链路状态，但没有结合预测功能对已承载业务的时间信息进行充分利用。总的来看，已有的工作多基于当前网络信息状态进行资源优化，引入业务时间特性预测时对资源当前使用情况缺乏全面考虑。本文提出一种改进的结合预测的多维感知 RSA 算法，利用 BP 神经网络（Back Propagation Neural Network, BPNN）挖掘业务的历史信息并预测业务未来的到达时刻和持续时间，结合当前网络的频谱状态在业务的候选路径中选择在时间域、频域和相邻链路这 3 个维度上资源争用程度最小的路径作为工作路径，从而降低网络的阻塞率。

1 多维感知 RSA 算法工作原理

本文提出的多维感知 RSA 算法的基本思路是：当新业务到达时，根据其源节点和目标节点计算候选路径的资源争用程度（综合考虑时域、频域、相邻链路），选择资源争用程度最小的路径作为本次业务的工作路径。

记到达的业务请求为 $R_i(s_i, d_i, B_i, T_i, t_i, E_i)$ ，其中 $s_i, d_i, B_i, T_i, t_i, E_i$ 分别代表业务 R_i 的起始节点、目标节点、所需的带宽、到达时刻、持续时间和结束时刻。当一条链路 l 需承载业务 R_0 时，假设链路 l 上业务的时间信息如图 1 所示，图中在 R_0 之前到达的业务的时间信息 (T_i, t_i) 全部已知，在 R_0 之后到达业务的时间信息 (T_i, t_i) 根据 BPNN 预测功能计算出。根据不同业务 (T_i, t_i) 的信息和当前业务 (T_0, t_0) 的关系将链路 l 上的业务基于持续时间重合程度^[11]（TC）分为三类：完全重合、部分重合和不重合。其中完全重合是指一个业务的到达时刻和离开时刻均在另一个业务的持续时间内，如图 1 中 R_6, R_3 与 R_0 的关系；部分重合是指一个业务的到达时刻在另一个业务的到达时刻之前，并且结束时刻在它的持续时间内，

如图 1 中 R_2 、 R_4 与 R_0 的关系；不重合是指一个业务的结束时刻在另一个业务的到达时刻之前，如图 1 中 R_1 、 R_5 与 R_0 的关系。业务时域上的重合一定程度上反映为实际的频隙资源争用，在 R_0 持续时间内上重合的业务越多，该条链路上空闲的频隙资源越少，影响后续到达业务的分配。

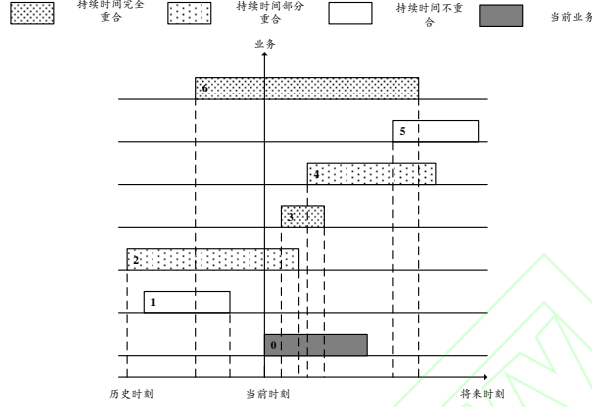


图 1 链路 / 业务请求时间信息

BPNN 预测模型因其良好的非线性拟合能力得到了广泛应用，其主要结构包括输入层、隐含层和输出层。每一层有若干节点构成，层与层之间通过节点相连。应用 BPNN 进行预测分为两步：第一步为训练过程，首先随机初始化 BPNN 各相连节点之间的权值和阈值，输入层输入训练数据，若节点通过 Sigmoid 函数计算出的结果大于这个节点的阈值，则将计算结果向后逐层传递，在输出层得到这组数据的输出结果并与期望值作比较，若两者误差值大于最小允许误差 E ，再根据误差大小反向调整传递过程中经过的各节点之间的权值和阈值。重复以上过程直到 BPNN 达到理想状态。第二步为预测过程，输入最近 n 个历史业务的到达时刻（ n 为输入层节点数）来预测后续到达业务 R_f 的到达时刻 T_f 。如果 T_f 在 R_0 的持续时间内，则 R_f 与 R_0 在未来某一段时间内会占用同一条路链路的频隙资源，二者存在时域重合，重合程度需要根据预测 R_f 的持续时间 t_f 来计算，此时再通过链路上最近 n 个历史业务的持续时间预测 t_f ；若 T_f 在 R_0 结束时刻后，则不会发生时域上的重合，预测过程结束。

进一步地，当新业务 R_i 的候选路径 P_i^k （第 k 条候选路径）包含某一链路 l_m 时，可以用式 (1) 表达 l_m 上的其它业务 R_j 与 R_i 的持续时间重合度（即对应的 $TC_{i,j}^{l_m}$ 值），其中 T_i ， t_i ， E_i 分别代表新业务 R_i 的到达时刻，持续时间和结束时刻； T_j ， t_j ， E_j 分别代表其他业务 R_j 的到达时刻，持续时间和结束时刻。

$$TC_{i,j}^{l_m} = \begin{cases} 0 & E_j < T_i \text{ 或 } T_j > E_i \\ t_i & T_j < T_i \text{ 且 } E_j > E_i \\ t_j & T_j > T_i \text{ 且 } E_j < E_i \\ E_j - T_i & T_j < T_i \text{ 且 } T_i < E_j < E_i \\ E_i - T_j & E_i > T_j > T_i \text{ 且 } E_j > E_i \end{cases} \quad (1)$$

定义链路的时间争用程度^[1] $LTC(l_m)$ ，其中 N 为链路 l_m 上与 R_i 在时域上有重合的业务数量（包括预测到达的业务）， t_i 为新业务的持续时间。 $LTC(l_m)$ 越大，链路 l_m 的频谱资源在 t_i 内被业务同时占用的程度越大，在 t_i 内能够空闲出的频谱资源越少。定义路径的时间争用程度 $PTC(P_i^k)$ 为候选路径 P_i^k 上所有链路时间争用程度的平均值，其中 $Num(l_m)$ 为路径包含的链路总数。

$$LTC(l_m) = \sum_j \frac{TC_{ij}^{l_m}}{N \times t_i}, l_m \in P_i^k \quad (2)$$

$$PTC(P_i^k) = \frac{\sum_m LTC(l_m)}{Num(l_m)}, l_m \in P_i^k \quad (3)$$

定义候选路径 P_i^k 在频域的资源争用程度 $PFC(P_i^k)$ ，考虑候选路径上被占用频隙占路径总频隙的比重，占比越大，这条路径上可用的频隙资源越少。式 (4) 中， $SL_{P_i^k} = 1$ 为路径上被占用的频隙， $|SL_P|$ 为路径的总频隙。

$$PFC(P_i^k) = \frac{Num(SL_{P_i^k}=1)}{|SL_P|} \quad (4)$$

EON 给业务分配频隙占用的资源会影响与业务工作路径上相邻链路的空闲频隙资源对齐程度，影响相邻链路上后到达业务的选路和频谱分配工作^[12]，因此，本文提出了相邻链路资源对齐程度的概念。定义相邻链路资源对齐程度 $PAL(P_i^k)$ ，考虑候选路径与相邻链路上重合的未占用频隙个数的均值占链路总频隙的比重， $PAL(P_i^k)$ 值越大，则选择这条路径承载业务后对相邻链路造成的影响越大。式 (5) 中 $Num(l_n)$ 为相邻链路的数量， $|SL|$ 为链路的总频隙数， $CIL_{l_n}^{P_i^k}$ 为候选路径 P_i^k 与其相邻链路 l_n 重合的未占用频隙数， $\frac{\sum_n CIL_{l_n}^{P_i^k}}{Num(l_n)}$ 为相邻链路重合未被占用频隙数的均值，如图 2 所示，候选路径 ABCF 有 4 条相邻链路，候选路径与 AD 的重合空闲频隙为 3，与 DB 的重合空闲频隙为 4，与 FE、EC 为 5 和 6，与相邻链路重合的未占用频隙数均值为 $(3+4+5+6)/4=4.5$ ，路径 ABCF 的相邻链路资源对齐程度为 $PAL(P^{ABCF}) = 4.5/12=0.375$ 。

$$PAL(P_i^k) = \frac{\sum_n CIL_{l_n}^{P_i^k}}{Num(l_n) \times |SL|} \quad (5)$$

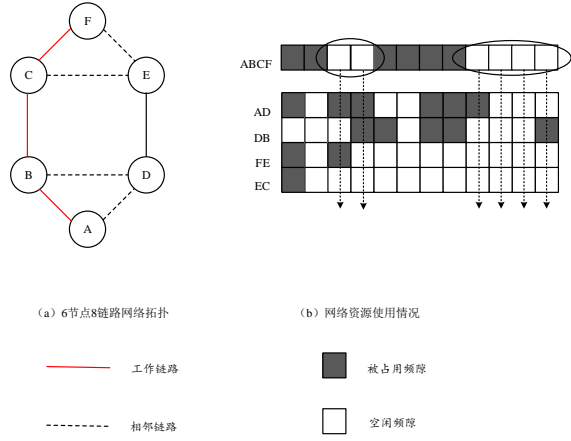


图 2 网络拓扑及网络资源使用情况

最后，综合考虑时间，频域，相邻链路三者的资源使用程度，总的资源争用程度定义如下：

$$RC(P_i^k) = PTC(P_i^k) + PFC(P_i^k) + PALC(P_i^k), k = 1, 2, 3 \dots \quad (6)$$

当新业务到达时，首先挑选出存在满足业务需求空闲频隙的候选路径，若都不存在则业务被阻塞，再根据候选路径上历史业务的时间信息通过 BPNN 进行预测，最后结合预测的结果综合考虑候选路径上时域、频域、相邻链路的资源争用程度，选择资源争用程度最小即 $RC(P_i^k)$ 值最小的路径作为本次业务的工作路径，MDA 算法伪代码如图 3 所示：

```

1.生成网络拓扑图，对于每一个节点对 (s, d)，用KSP算法计算k条最短候选路径
2.while 新业务R到达
3.  if 已承载业务的结束时刻<到达时刻
3.   释放已承载业务频谱资源
5. end if
6. 设置Flag=false
7.  for each 候选路径
8.   if 路径存在连续的频隙承载新业务
9.    设置Flag=true
10.   预测未来业务的时间信息
11.   计算路径的资源争用程度
12.  end if
13. end for
14. if Flag=false
15.  业务被阻塞
16. else

```

图 3 MDA 算法伪代码

2 数值仿真和结果分析

为了验证提出的 MDA 算法性能，本文使用 NFSNet 进行仿真。仿真网络中每条链路存在 320 个频隙资源，每个频隙资源为 12.5GHz。业务速率在 10~400Gb/s 内随机生成，业务到达和持续时间分别按照均值为 λ 的泊松分布和均值为 μ^{-1} 的指数分布，仿真对业务采用固

定的调制格式，即 BPSK 调制。预测使用的 BPNN 只包含一个隐含层，输入层节点数为 8，隐含层节点数为 10，输出层节点数为 1，训练过程的允许最小误差 E 为 0.08^[9]。在仿真网络中任选一条链路上的业务时间信息预测结果如图 4 和图 5 所示，预测的平均相对误差分别为 10.76%和 18.37%，基本达到预测目的。

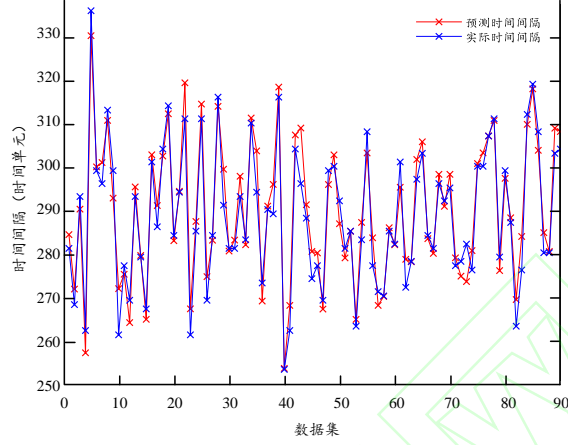


图 4 泊松分布到达时间间隔预测

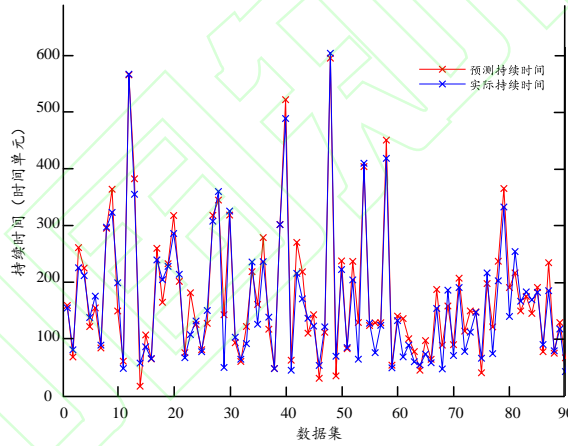


图 5 指数分布持续时间预测

本文将不考虑多维资源使用情况的 D+FF (D 算法和首次命中) 和 KSP+FF (K 条最短路径算法和首次命中) 以及文献[10]提出的基于频谱碎片的 RSA 算法 (DF 算法) 作为对比算法，MDA 候选路径由 KSP (K=3) 算法生成。仿真主要对比带宽阻塞率^[13] (BBP) 的差异， BBP 定义为被阻塞业务总带宽占到达业务总带宽的比重。

仿真结果的 BBP 如图 6 所示。随着业务量的增加，仿真算法 BBP 均成上升趋势；在网络业务量较小时相差不大；在网络业务量为 300erl 时，MDA 比 D+FF、KSP+FF 和 DF 分别降低了 6.2%、2.6%和 1.2%；在网络业务量为 600erl 时，MDA 比 D+FF、KSP+FF 和 DF 分别降低了 9.4%、4%和 2.1%。D+FF 因为只考虑最短路径是否有空闲频谱资源，所以 BBP 四种算法中最高；KSP+FF 和 DF 虽然加入了候选路径，也将频谱资源使用情况考虑在内，但是没有考虑候选路径上时域和相邻链路的资源使用情况，所以 BBP 比 MDA 略高；MDA 的 BBP

最低，因为 MDA 比其余 3 种算法更优化，考虑多维资源的使用情况选择争用程度最小的路径作为工作路径，因此可以有效降低带宽阻塞率。

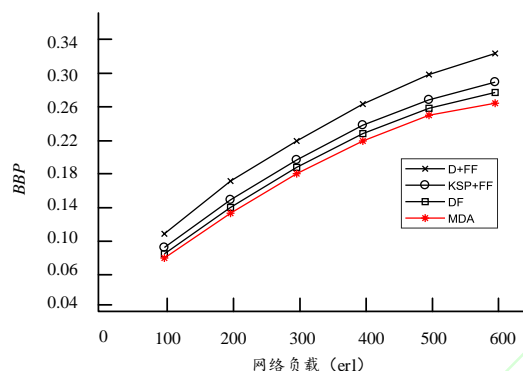


图 6 带宽阻塞率比较

3 结束语

对业务进行预测并据此优化资源分配算法，是弹性光网络中一个重要的研究课题。本文提出了一种弹性光网络中结合预测的多维感知 RSA 算法，通过 BPNN 的预测功能计算链路的时间争用程度，再结合频域、相邻链路的资源使用情况为当前业务选择资源争用程度最小的工作路径，理论分析和数值仿真结果表明与 D+FF、KSP+FF 传统 RSA 算法以及仅考虑频谱资源的 DF 算法相比能有效降低业务带宽阻塞率。

参考文献

- [1] Cisco.Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017-2022 White Paper[EB/OL]. 2019.02[2020-07-20].https://www.cisco.com/c/zh_cn/about/press/2019/02-22.html?dtid=osscdc000283
- [2] Gerstel O, Jinno M, Lord A, et al. Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?[J]. Communications Magazine, IEEE, 2012, 50 (2) :s12-s20.
- [3] 肖媚, 何动, 张振荣. 基于 OOFDM 的弹性光网络研究[J]. 光通信技术, 2013, 037 (004) :29-32.
- [4] Singh S K, Jukan A. Non-disruptive spectrum defragmentation with holding-time awareness in optical networks[J]. 2016:1-6.
- [5] 刘焕淋, 陈德润, 陈勇, 等. 业务持续时间感知的弹性光网络能效路由算法[J]. 中国科学:信息科学, 2018, 48(8):1065-1075.
- [6] 熊余, 马礼冬, 王汝言. 带有业务持续时间感知的节能共享保护[J]. 华中科技大学学报:

自然科学版, 2014 (10) :25-30.

[7] ZHANG S, XU Z, DU S, et al. Routing and Spectrum Assignment Algorithm with Traffic Prediction and Periodic Rerouting in Elastic Optical Networks[C]// 2019 IEEE 11th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), June 12-15, 2019, Chongqing, China. Piscataway, NJ:IEEE, 2019:17-21.

[8] Chen X, Li J, Zhu P, et al. Fragmentation-Aware Routing and Spectrum Allocation Scheme Based on Distribution of Traffic Bandwidth in Elastic Optical Networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2015, 7(11):1064-1074.

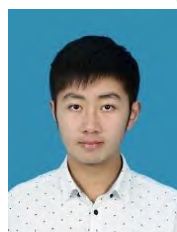
[9] Horota A, Reis L, Figueiredo G, et al. Routing and Spectrum Assignment Algorithm with Most Fragmented Path First in Elastic Optical Networks[J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(6):2980-2986.

[10] 薛磊冰, 沈建华. 基于频谱碎片权值评估的弹性光网络 RSA 算法[J]. 光通信研究, 2017,(2):30-32.

[11] Jia W B, Xu Z Q, Ding Z, et al. An Efficient Routing and Spectrum Assignment Algorithm Using Prediction for Elastic Optical Networks[C]// 2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence (ISAI). June 24-26, 2016, Hong Kong, China. Piscataway, NJ:IEEE, 2016:89-93.

[12] Yin Y, Zhang H, Zhang M, et al. Spectral and Spatial 2D Fragmentation-Aware Routing and Spectrum Assignment Algorithms in Elastic Optical Networks [Invited][J]. Journal of Optical Communications & Networking, 2013, 5 (10) :A100-A106.

[13] Shi, Weiran, Zhu, et al. On the Effect of Bandwidth Fragmentation on Blocking Probability in Elastic Optical Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61 (7) :2970-2978.



作者简介: 徐凯 (1996-), 男, 江苏无锡人, 硕士研究生, 现就读于南京邮电大学通信与信息工程学院电子与通信工程专业, 主要从事由机器学习辅助的弹性光网络方向的研究, 并针对传统 EON 中 RSA 算法的不足进行优化及仿真。

***通信作者:** 沈建华 (E-mail: shenjh@njupt.edu.cn)。

