

文章编号:1007-5321(2010)06-0013-04

可升级光网络中感知损伤的路由波长和补偿分配

高冠军, 张 杰, 顾婉仪

(光通信与光电子学教育部重点实验室(北京邮电大学), 北京 100876)

摘要: 研究了具有混合传输速率、调制格式和动态色散补偿特性的容量可升级透明光网络中的光路连接分配问题. 提出了 2 种感知损伤的路由波长和补偿量分配算法(IA-RWCA). 仿真结果表明,与已有感知损伤的路由和波长分配算法相比,IA-RWCA 算法可以显著改善网络性能,降低网络阻塞率.

关键词: 透明光网络; 混合速率传输; 感知损伤的路由波长分配算法; 可调色散补偿器; 补偿量分配
中图分类号: TN929. 53 **文献标志码:** A

Impairment-Aware Routing Wavelength and Compensation Assignment in Upgradeable Optical Networks

GAO Guan-jun, ZHANG Jie, GU Wan-yi

(Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications (Beijing University of Posts and Telecommunications),
Ministry of Education, Beijing 100876, China)

Abstract: Lightpath connection provisioning problem for capacity upgradeable transparent optical networks with hybrid line rates, modulation formats and dynamic dispersion compensation characteristic are investigated. Two impairment-aware routing, wavelength and compensation assignment algorithms are proposed. Simulations show that the proposed algorithms can improve the network performance significantly with much lower blocking probability, compared to the existing impairment-aware routing and wavelength assignment algorithms.

Key words: transparent optical networks; hybrid line rate transmission; impairment aware routing and wavelength assignment; tunable dispersion compensator; compensation assignment

随着数据网络流量爆炸式的增长,将现有透明全光网络容量从单波长 10 Gbit/s 升级到 40 Gbit/s 的需求日益迫切. 透明全光网络容量升级中最有效的一种方式是利用已有的光纤链路传输结构,只升级骨干链路两端的发射/接收机^[1]. 在这种情况下,混合速率的网络场景(即 10 Gbit/s 与 40 Gbit/s 或更高速率信道混合传输)逐渐涌现^[1-3]. 由于这些具

有不同调制格式和速率的信号在传输时对应的物理损伤及其容限具有较大差异,所以在 40 Gbit/s 及以上传输系统中通常需要可调色散补偿器(TDC)在接收端对该光路信号进行波长级别的动态残余色散补偿^[2]. 此外,在容量可升级透明光网络中,由于动态波长路由选择的影响,不同路径积累的残余色散也存在较大差异. 因此,在如图 1 所示的容量可升级

收稿日期: 2010-01-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB328204); 国家高技术研究发展计划项目(2008AA01A32, 2006AA01Z244); 国家自然科学基金项目(60772022, 60932004); 教育部博士点基金项目(20090005110013)

作者简介: 高冠军(1984—), 男, 博士生, E-mail: championgao@gmail.com; 顾婉仪(1946—), 女, 教授, 博士生导师.

网络中,色散补偿的可调节性、残余色散的累积差异以及差异化的色散容限要求等三方面的动态特性将成为容量可升级混传网络的重要特征.

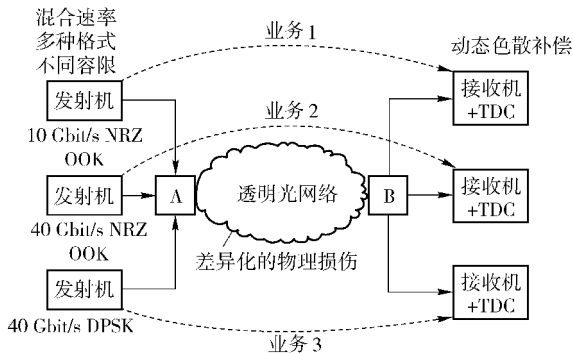


图1 容量可升级透明混传光网络模型

目前国际上对具有上述特性的网格化、动态、灵活透明的混传光网络的性能研究较少. 文献[4-5]分别利用残余色散信息的波长分配算法(IA-RWA)和信道规划方法来降低10 Gbit/s和40 Gbit/s混传网络中的物理层阻塞. 但是,上述方法均没有考虑TDC的动态特性对混传网络的影响. 实际上,在TDC混传全光网络的连接建立过程中,除了原有的路由波长分配(RWA)问题外,还包括和信号速率格式及波长路径选择相关的TDC补偿分配. 这样,原有的RWA问题变为路由波长和RWCA问题. 针对该问题提出了2种TDC混传光网络中的RWCA策略:联合分配(joint RWCA)和分离分配(Disjoint RWCA)以及相关的波长和补偿量分配算法(WCA). 仿真结果表明,与原有RWA技术相比,IA-RWCA算法可以显著提高网络性能,降低网络阻塞率.

1 感知损伤的RWCA策略和算法

1.1 TDC补偿分配方案

TDC补偿的目标是针对特定业务色散容限,对某一路由波长选择,寻找合适的色散补偿量. TDC可以对传输信号进行波长级别的有效色散调节,其限制因素为

$$|R_i| < \delta \quad (1)$$

$$\delta_{T,\min} < T_i < \delta_{T,\max} \quad (2)$$

其中, R_i 为第*i*个波长在接收端未经TDC补偿时的残余色散; δ 为该波长业务的色散容限; T_i 为待分配的TDC补偿量,在 $[\delta_{T,\min}, \delta_{T,\max}]$ 范围内以特定补偿进行调节. 补偿范围取决于信号的传输速率和调制格式. 光路最终的残余色散为

$$R_i = L_i + T_i \quad (3)$$

$$L_i = \sum (D_{tx} + D_{def}) \quad (4)$$

其中, L_i 表示未经TDC补偿时该波长上积累的线路残余色散,可由线路上传输光纤的累积色散(D_{tx})和DCF光纤的累积色散(D_{def})得到. 对于路由和波长确定的光路连接, L_i 为固定值. L_i 代表路由和波长分配的结果,而 T_i 代表在式(1)、式(2)限制下补偿分配的结果.

1.2 已有感知损伤的波长分配技术

采用文献[4]中的下列分配算法进行对比,包括:

1) First-Fit 算法. 传统的首次命中策略,未考虑物理损伤信息;

2) Min-RD-Fit 算法. 将所有可用波长按照残余色散排序,每次选择当前集合中残余色散最小的可用波长.

3) Fittest-RD-Fit 算法. 将所有可用波长按照残余色散排序,每次选择残余色散恰好符合该业务容限要求的波长建立连接. 由于该算法为未来的连接建立请求预留了残余色散较小的波长,所以整体网络性能最好^[6].

1.3 分离和联合的RWCA算法

图2和图3分别为分离和联合的RWCA算法流程. 与联合的RWCA算法相比,分离的RWCA算法将路由波长和补偿分配分成3个不相关的子问题分别解决,当连接建立请求到达时,分离的RWCA算法首先通过IA-RWA或传统的RWA进行路径选择和波长资源分配,随后根据确定路由和波长分配结果及特定色散容限分配合适的TDC补偿量. 如果存在合适的残余色散补偿量,下达TDC调节命令,建路成功,否则阻塞. 在分离的RWCA算法中,波长分配策略可以采用已有的First-Fit算法和Min-RD-Fit算法,随后对选定的波长再进行补偿量分配,这2个过程是相对独立的. 但是由于Fittest-RD-Fit算法是按照最终接收端的残余色散容限进行波长选择的,所以无法在分离的RWCA中采用. 对此,提出了用于联合WCA的Max-DC-Fit-C算法,其流程如图3所示.

联合RWCA将波长和补偿分配问题结合起来考虑,类似于基于分层图的RWA机制. Max-DC-Fit-C算法的主要思想是:如果当前可用波长集合中没有能满足色散容限的波长选择(未经TDC补偿),则选择具有最大TDC色散补偿值的波长,并采用该波

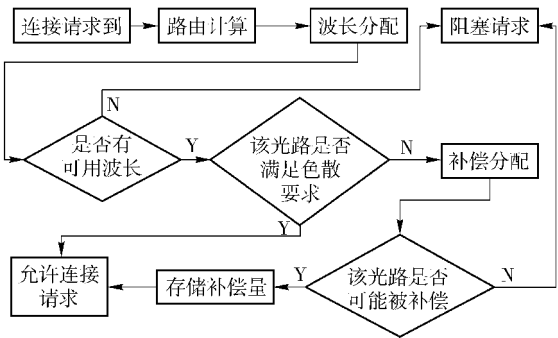


图 2 分离 RWCA 算法框图

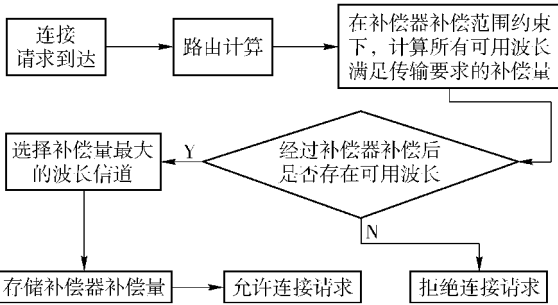


图 3 联合 RWCA 算法 (Max-DC-Fit-C) 框图

长所预计算出的 TDC 补偿值。如果有可用波长集合在未经 TDC 补偿前就可以满足容限,则按 Fittest-RD-Fit 算法选择波长,进行建路。对于前者,首先对每个空闲波长资源进行 TDC 补偿的预评估,每个波长预估计的色散补偿必须使得该波长能满足其所承载的色散容限要求;随后,选择具有最大预估补偿量的波长,并分配相关的补偿量。由于 Max-DC-Fit-C 算法所选波长满足色散容限要求时对应的补偿量最大,所以后续的连接请求所预留的波长只需分配较小的补偿量就能满足色散容限要求。因而 Max-DC-Fit-C 算法可以减小苛刻的色散容限引起的物理层阻塞。

2 仿真及分析

基于图 4 所示的参考网络拓扑对上述算法进行仿真验证。图中的拓扑包括 24 个全光节点和 43 条链路。每段链路上标识的数字表示该链路上的距离(单位为 km)。每条链路都由不同方向的一对光纤构成,每个方向包括 32 个可用波长,链路色散补偿不匹配导致的色散补偿率在 98.02% ~ 99.88% 之间。

各种典型调制格式对应的色散容限以及 TDC 的调节范围如表 1 所示,其中色散容限和 TDC 补偿范围前后数值分别对应传输速率为 10 Gbit/s 和 40 Gbit/s 时的各类调制格式对应的色散容限和补偿

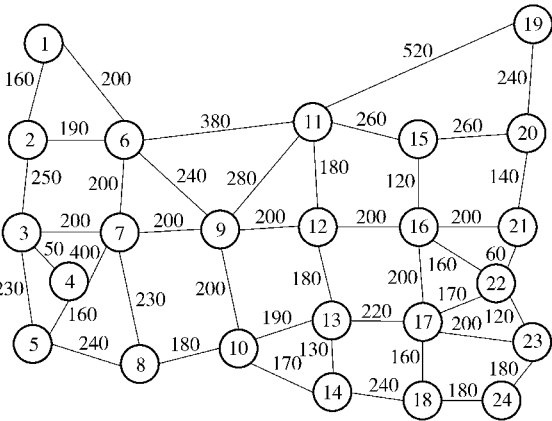


图 4 参考网络拓扑

范围。在每个节点均匀分布随机产生各种调制格式的业务,其到达时间服从泊松分布,连接持续时间服从负指数分布。不同格式和速率对应的色散容限值参考文献[6-7]。在以距离作为权重的最短路径算法下,比较了 First-Fit、Min-RD-Fit、Fittest-RD-Fit、基于 First-Fit 和 Min-RD-Fit 策略的分离 WCA 算法 (First-Fit-C, Min-RD-Fit-C) 以及联合 WCA 算法 (Max-DC-Fit-C) 的网络阻塞率性能。除了以距离作为权重的最短路径算法外,算法中也支持以负载等因素作为权重的路由策略^[8]。

表 1 不同业务格式的色散容限和 TDC 补偿范围

速率/ (Gbit·s ⁻¹)	调制 格式	色散容限/ ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹	TDC 补偿范围/ ps·nm ⁻¹
10/40	NRZ OOK	± 1 000/62.5	700 ~ 1 300/ 300 ~ 700
10/40	50% RZ-OOK	± 500/31	700 ~ 1 300/ 300 ~ 700
10/40	ODB	± 4 000/250	700 ~ 1 300/ 300 ~ 700
10/40	NRZ DPSK	± 1 500/94	700 ~ 1 300/ 300 ~ 700
10/40	RZ DQPSK	± 2 000/125	700 ~ 1 300/ 300 ~ 700

在 5 种调制格式和速率情况下比较了各算法的网络阻塞率和业务量之间的对应关系,仿真结果如图 5 所示。每个业务的速率在 10 ~ 40 Gbit/s 之间服从均匀分布(概率各占 50%),调制格式从表 1 所示的 5 种调制方式中以均匀分布的方式随机产生(每种调制格式比例各占 20%)。

3 种 WCA 算法的阻塞率性能都优于其对应的

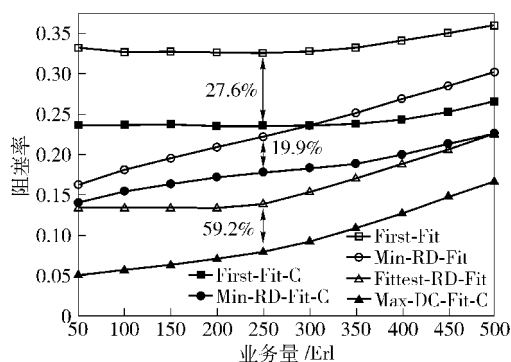


图5 WA 和 WCA 的阻塞率性能(5 种调制格式)

WA 算法,而 Max-DC-Fit-C 算法具有最低的阻塞率。这是因为当存在不需要 TDC 调节就可以满足色散容限的波长时,Max-DC-Fit-C 算法根据 Fittest-RD-Fit 算法来选择波长,此时不涉及补偿量的分配。而 Fittest-RD-Fit 算法的性能则是所有 WA 算法中性能最好的。当没有满足色散容限要求的波长时,Max-DC-Fit-C 算法通过选择补偿量预估计为最大的波长建立连接,相对的预留了的可用波长都具有较大的色散补偿可调范围,可以满足以后色散容限更为苛刻的连接请求,因此提高了网络整体性能。与 WA 算法相比,WCA 算法的阻塞率性能有了显著改善,从图 5 中可以看出,在业务量为 250 Erl 时,First-Fit-C 和 Min-RD-Fit-C 算法与相对应的 First-Fit 和 Min-RD-Fit 算法相比,阻塞率分别降低了 27.6% 和 19.9%。而与 WA 算法中性能最好的 Fittest-RD-Fit 算法相比,Max-DC-Fit-C 算法的阻塞率降低了 59.2%,网络性能的改善效果显著。但是,并非所有的 WCA 算法都好于 WA 算法,与 Fittest-RD-Fit 算法相比,分离的 WCA 算法(First-Fit-C 和 Min-RD-Fit-C)性能较差。

定义动态补偿率(DCR, dynamic compensation rate)为需要补偿调节才能建立的连接数与总的连接建立数的比值,该参数表示 TDC 的平均占用效率。DCR 越大,表示为了减小物理层阻塞而需要的 TDC 就越多,从而网络的运营开销就越大。图 6 所示为 5 种调制格式和 10、40 Gbit/s 速率业务均匀分布时各种 WCA 算法所对应的 DCR 随业务量的变化情况。可以发现,Min-RD-Fit-C 算法对应的 DCR 在业务量较低时非常小,但随着网络业务量增加而不断增加。这是由于 Min-RD-Fit-C 算法总是选择残余色散最低的波长来建立当前连接,所以每次连接建立所需要调节的色散补偿量都最小,而剩余的可用

波长都具有较大的残余色散。当后续的连接请求到达时,在这些剩余可用波长上建立连接自然需要较大的残余色散补偿。尽管 Max-DC-Fit-C 算法的阻塞率最低,但由于其每次选择残余色散补偿量最大的波长建立连接,所以 DCR 也最高。

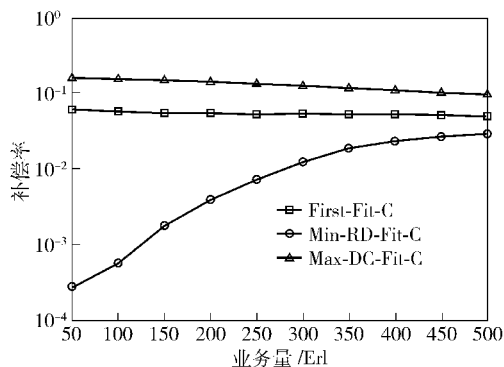


图6 各种 WCA 算法的 DCR 对比(5 种调制格式)

考察了 10 Gbit/s NRZ-OOK、40 Gbit/s RZ-DQPSK 两类调制格式具有不同比例时的各类算法性能。其中 40 Gbit/s 业务的比例分别占 30%、50%、70%。由于篇幅所限,文中省略了 2 种调制格式按不同比例混传时的仿真结果。但是不同算法的性能比较与 5 种调制格式同时存在下的仿真结果相似,从而证明了 RWCA 算法在不同比例、格式混传网络中均具有较好的适用性。其中,网络整体阻塞率的仿真结果与图 5 相似,相对于其他分离的 RWCA 算法,Max-DC-Fit-C 算法显著降低了网络整体阻塞率。而 40 Gbit/s 业务比例占 30%、50%、70% 时各种 WCA 算法所对应的动态补偿率仿真结果与图 6 所示的 5 种调制格式均匀分布时的结果相似。

3 结束语

研究了具有混合速率、调制格式和 TDC 动态补偿条件下的容量可升级透明光网络中的 RWCA 问题。提出了基于分离、联合的 2 种 RWCA 策略。仿真结果表明,作为联合策略的 Max-DC-Fit-C 算法具有最佳的网络性能。与传统的 WA 算法相比,WCA 算法显著降低了网络的阻塞率,提高了混传网络性能。

参考文献:

- [1] Binh L N, Huynh T L. Phase-modulated hybrid 40 Gb/s and 10 Gb/s DPSK DWDM long-haul optical transmission [C] // OFC/NFOEC 2007. San Diego: IEEE Press, 2007: JWA94.