

文章编号 1004-924X(2016)增-0323-07

采用动态交错聚合机制改善混合光 交换网络的阻塞性能

柳春郁^{1,2}, 刘昌兴², 孟祥宇², 杨九如^{1,2*}

- (1. 黑龙江大学 黑龙江省普通高等学校电子工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 黑龙江大学 电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:在混合光交换网络中,为降低虚波群调度(VWGS)所致的高阻塞率与传输延迟,提出了基于动态交错的聚合机制(DIA)以避免波带、波长业务间的竞争。DIA 机制在不同边缘节点采用奇偶交错的波长聚合方式,有效实现波带业务间的隔离;并依据费雪公式动态优化波带、波长信道容量,降低业务在核心节点的碰撞几率。数值结果表明,DIA 机制保证了带宽分配的灵活性,改善了业务的阻塞与延迟特性,与 VWGS 相比,中低流量下的丢弃率降低约 0.5~3 个数量级,平均边缘-边缘传输延迟减少 25~40%。DIA 机制无需配置波长转换与光缓存等器件,在保持能耗与成本有效性的同时,可兼顾业务在阻塞与延迟方面的服务质量要求,从而有效提升波带-波长混合光交换网络的实用性。

关键词:光交换网络;混合光交换;波带聚合;动态交错聚合;阻塞率;边缘-边缘传输延迟

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0323

Blocking improvement of hybrid optical switching networks by dynamic interlaced assembly

LIU Chun-yu^{1,2}, LIU Chang-xing², MENG Xiang-yu², YANG Jiu-ru^{1,2*}

- (1. Key lab of Electronics Engineering, College of Heilongjiang Province, Heilongjiang University, Harbin 150080, China;
 2. College of Electronics Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)
- * Corresponding author, E-mail: yangjr@hlju.edu.cn

Abstract: In hybrid optical switching networks, a waveband switching method named dynamic interlaced assembly (DIA) for the reductions of high blocking rate and edge-to-edge delay of the virtual wave group scheduling (VWGS) was proposed, in order to avoid the contention of waveband and wavelength channels. At edge nodes, the DIA gathered the wavelengths into a waveband with odd/even and positive/negative sequence to increase the separation among services. Furthermore, the number of wavelength channels was dynamically optimized and the contending probability of traffic was decreased at core nodes based on Ferry formula. The numerical results show that, DIA improves the blocking and delay with high flexibility of waveband assignment. Compared with VWGS, the blocking rate is lowered about 0.5–3 levels and the average edge-to-edge delay is reduced by 25%–40% in

收稿日期:2016-05-23;修订日期:2016-06-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61302075, No. 61205071, No. 61177079)

light and middle traffic states. Without the supports of wavelength tunable converters and optical buffers, DIA could guarantee the requirements of services with respects to loss and delay with high efficiency of energy consumption and cost, thus proving to be a promising technology to enhance the practicality of hybrid optical switching networks.

Key words: optical switching network; hybrid optical switching; waveband assembly; blocking rate; edge to edge delay; Dynamic Interlace Assembly(DIA)

1 引言

光传输技术的快速发展促进了它在数据中心、自由空间/室内及电力线网络中的应用^[1-4]。与之相比,光分组/突发交换(网络)则受限於光开关与缓存技术瓶颈,实用化进展缓慢^[5-6]。为改善光电路交换的传输效率及能效,基于波带-波长的混合交换(Hybrid Optical Switching, HOS)技术成为近期的研究热点。HOS 无需光缓存、光开关等器件的支持,具有丢弃率低,端口节省性好,与电路交换“无缝”兼容等优点,被认为是下一代光因特网的主要备选方案之一^[7-10]。当前 HOS 的研究主要集中于提高带宽分配的灵活性与网络传输效率。基于波长转换器,Cao 等提出动态波带路由方案,但却令交换节点的结构和信号处理变得异常复杂^[11]。Hideki 期望通过可调谐波带滤波器(Tunable Waveband Filter, TWBF)来提高网络适应动态业务的能力^[12],但其实用性受限於 TWBF 的调谐范围(约 1~2 nm)^[13]。与之相比,基于子波长信道融合和虚波群的动态波带调度(Virtual Wave Group Scheduling, VWGS)方案则展示了高的灵活度与网络传输效率,可有效支持用户的区分服务要求^[14-16]。其不足在于,信道选取的随机性导致较高的波带/波长阻塞率,并增加了对应的边缘-边缘传输延迟。

本文从边缘节点的子波长融合机制入手,提出一种基于动态交错聚合(Dynamic Interlaced Assembly, DIA)的波带/波长分配方案。DIA 方案采用“奇/偶”及“正/逆序”相结合的波长选取机制,能够有效降低不同光纤链路/边缘节点内的波带/波长碰撞几率,从而改善混合交换网络的阻塞率。

2 动态交错聚合机制原理

在 VWGS 中,根据 Horizon 策略^[17],当有波

带业务 a 到达网络边缘节点,依据其业务要求(如子波长数 ω)顺序选择最近可用空闲波长信道,并产生相应的波带控制分组 C_a 。当达到聚合门限时, C_a 先于业务 a 发送,为其预留所需带宽资源。对应地,在核心交换节点,多粒度光交换矩阵(MG-OXC)控制单元根据 C_a 的请求,令该 ω 个波长开关协同工作,构成虚波带信道 $b = \{1, 2, \dots, \omega\}$ 。最后,当边缘节点接收到目的节点发出的应答信息后,业务 A 开始在整个光纤链路中透明传输。可见,与传统的静态波带分配机制相比,VWGS 破除了波长连续性原则的限制,增强了带宽分配的灵活性与有效性;而在核心节点的 MG-OXC 中也无需配置固定的波带开关,基本开关单元仍为波长选择开关,有利于 WBS 与电路/分组交换的兼容。设光纤链路 i 内的波长道数为 W ,波带业务的子波长信道数为 ω_i ,到达速率为 λ_i ,服务速率为 μ_i ,且交换节点无光缓存和波长/波带转换配置。若波带间相互独立,则其阻塞率 P_0 满足 M/M/1/1 过程,可近似表示为^[18]:

$$P_0 = \frac{\rho}{1 + \rho}, \quad (1)$$

其中: $\rho = \lambda_i / \mu_i$,为流量载荷/信道。然而,在多光纤链路条件下,两波带中任意波长信道的重合均将导致波带传输的阻塞与延迟。设 n 为光纤链路数,链路 i 内波带的阻塞几率 P_i 可表示为:

$$P_i = \binom{n}{1} \cdot [1 - P\{\omega_i | (W - \omega_i)\}]. \quad (2)$$

设输入端口为 N ,输出端口为 M ,核心交换节点处的波带阻塞率 P_i 可表示为:

$$P_i = \frac{N}{M} P_0 \cdot P_i =$$

$$\binom{n}{1} \frac{N}{M} \frac{\rho}{1 + \rho} \cdot [1 - P\{\omega_i | (W - \omega_i)\}]. \quad (3)$$

由式(3)易知, P_i 是 n 和 ω_i 的单调递增函数,在多链路、多波长聚合的条件下, P_e 将远大于电路交换的阻塞率^[14]。而且,不同光纤链路中的

ω_i 随机选取机制将导致 VWGS 阻塞性能的进一步恶化。为此,这里规范光纤链路内的波带分配机制,增加波带/波长间的隔离度,从而降低波带-波带、波带-波长间的阻塞几率。值得注意的是,ITU-T 规范化标准可将复杂的光骨干网络简化为“边缘-核心”模型。基于二者传输速率间的关系,设定每个核心节点与 4 个边缘节点相连接,并将“奇/偶”及“正/逆序”分配原则应用于子波长融合策略中,实现不同光纤链路中波带的动态交错聚合。

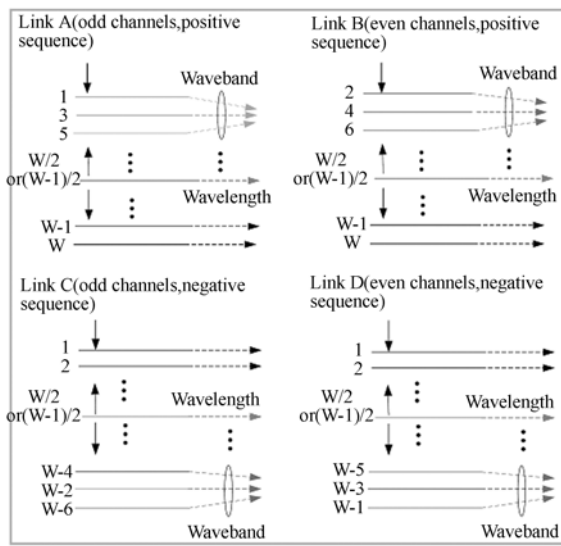


图 1 动态交错聚合机制原理

Fig. 1 Basic principles of Dynamic Interlaced Assembly (DIA) mechanism

在 DIA 中,设光纤链路集合 $E = \{A, B, C, D\}$, 光纤内的波长总数为 W , 对每个波长信道进行物理编号。假设要获得 $\omega_i = 3$ 的波带分配, 这里规定(如图 1 所示): 若业务在链路 A 中, 则从物理编号为 2 的波长信道开始, “顺序”为其搜寻 3 条物理编号为“奇数”的可用信道; 对于独立波长信道的业务要求, 则顺序从物理编号为 $W/2$ (W 为偶数; 若 W 为奇数, 则相应变为 $(W-1)/2$) 的信道开始搜寻可用的波长信道。若业务在链路 B 中, 波长信道的选择从物理编号为 2 的信道开始, “顺序”为其搜寻 3 条物理编号为“偶数”的可用信道; 独立波长信道业务“顺序”从物理编号为 $W/2$ (W 为偶数; 若 W 为奇数, 则从编号为 $(W-1)/2$ 的信道开始搜寻可用波长信道。类似

地, 对于链路 C 和 D, 波带分别从物理编号为 W 和 $W-1$ 的波长信道开始, “逆序”为其搜寻 3 条物理编号为“奇数”和“偶数”的可用信道, 对应的独立波长业务从物理编号为 $W/2$ (W 为偶数; 若 W 为奇数, 则为 $(W-1)/2$) 的信道开始, “逆序”搜寻可用的波长信道。

可见, DIA 机制首先将光纤链路内的波长信道划分成波带与波长两个区域, 增加了波带与波长间的隔离度。而且, 由于链路 A 和 B 的波带划分按照自上而下、奇偶交错的方式进行, 而链路 C 和 D 的波带划分则是按照自下而上、奇偶交错的方式分配。因此, 只要边缘节点具有足够的空闲波长信道, 那么就可以保证波带用户间的“零几率”信道竞争。进一步地, 设子波长信道数的下限为 $\omega_{i, \min} = 2$, 上限为 $b_{\max, i}$, 且由文献[19]有:

$$b_{\max, i} = \lceil \frac{W + b_{\max, i-1}}{M} \rceil, \quad (4)$$

其中, “ $\lceil \rceil$ ”为上取整, $i = 1, 2, \dots$ 。于是, 以链路 A 为例, 设到达业务 a 的要求波长信道数为 ω_i , 对应 DIA 机制的波带分配算法可描述为:

- ① 若 $\omega_i \geq \omega_{i, \min}$, 转至②; 否则, $\omega_i = 1$, 跳转至⑩;
- ② 从信道 1 开始, 顺序搜寻到当前可用编号奇数的波长信道 n_o , 若 $n_o < \omega_{i, \min}$, 则跳转至⑩;
- ③ 若 $\omega_i \leq n_o < b_{\max, i}$, 则为业务 a 分配 ω_i 个波长信道;
- ④ 若 $n_o > \omega_i \geq b_{\max, i}$, 则 $\omega_i = b_{\max, i}$;
- ⑤ 若 $\omega_{i, \min} \leq n_o < \omega_i$, 则令 $\omega_i = n_o$;
- ⑥ 否则, 从信道 $W/2$ (或 $(W-1)/2$) 开始, 顺序搜寻到当前可用编号偶数的波长信道 n_e , 若 $n_e < \omega_{i, \min}$, 则跳转至步骤⑩;
- ⑦ 若 $\omega_i < n_e < b_{\max, i}$, 则为业务 a 分配 ω_i 个波长信道;
- ⑧ 若 $n_e > \omega_i \geq b_{\max, i}$, 则 $\omega_i = b_{\max, i}$;
- ⑨ 若 $\omega_{i, \min} < n_e \leq \omega_i$, 则令 $\omega_i = n_e$;
- ⑩ 从信道 $W/2$ (或 $(W-1)/2$) 开始顺序为其搜寻当前可用的波长信道, 若成功获取信道, 将其分配给业务 a ; 否则, 返回①, 直至生存周期 T_L 耗尽, 发送信道建立失败回执。

3 数值仿真与性能评价

在如图 2 所示的仿真模型中, 设边缘-边缘的传输距离 $L = 300$ km, 输入端口和输出端口分别

为 $N=4$ 和 $M=4, n=1$, 核心节点无波长/波带转及光缓存设备; 边缘节点的数据到达速率为 2.5 Gb/s , 控制信道与数据信道的传输速率分别为 2.5 Gb/s 和 10 Gb/s , 且波长/波带业务的到达速率 λ_i 和服务速率 μ_i 均服从指数分布, $T_L = 300 \text{ ms}$, 波带内的平均子波长信道数为 \overline{w}_i , 设网络中的波带与波长业务比 $\eta \leq 1$; 边缘节点采用固定聚合门限同宿机制, 门限值固定为 $500 \text{ KB}^{[20]}$ 。于是, 基于 DIA 机制的混合交换网络阻塞特性如图 3 所示。

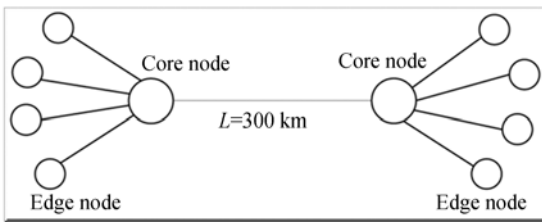
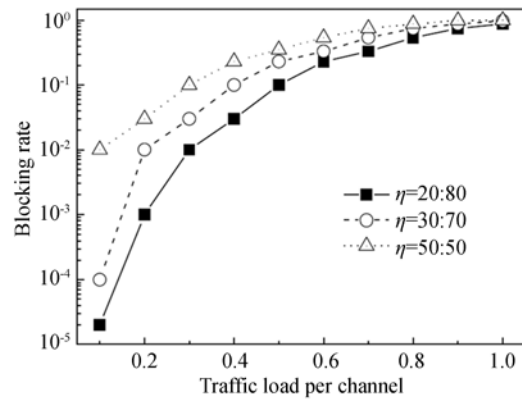


图 2 混合交换网络的仿真模型

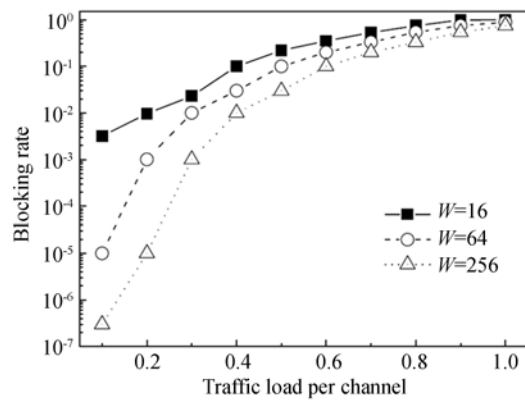
Fig. 2 Simulation model of hybrid optical switching networks

在图 3(a)中, 设定 $W = 64, \overline{w}_i = 3$ 。于是, 当 $\eta = 20 : 80$ 时, 波带的阻塞率较低。 $\rho = 0.1$ 时, P_l 值仅为 10^{-5} 。随着 η 值的增加, 波带业务所需的空闲信道将逐渐增多, 导致各光纤链路内的波带重合率持续增加。当 $\eta = 50 : 50$ 时, 其 P_l 值已与电路交换网络 ($\overline{w}_i = 1$) 的结果相接近。另一方面, 当 $\eta = 20 : 80$ 时, 随着链路内流量载荷的增加, 波长业务所占据的信道越来越多, 波带区域被不断压缩。相应地, 各链路间波带与波长业务的重叠几率大大增加, 这亦导致核心节点的阻塞性能迅速劣化。

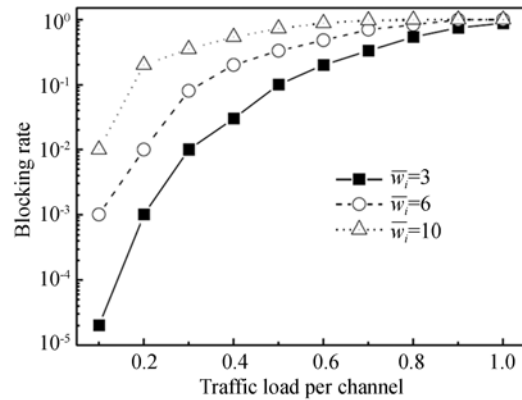
进一步地, 本文分别评价了参数 W 和 i_w 对 WBS 网络核心节点阻塞性能的影响。由图 3(b) 可知, 随着 W 值的增加, 各光纤链路内波带业务按照 DIA 机制可选择“奇/偶交错”空闲信道的几率增加, 因而波带间的阻塞率逐渐降低。当 $W = 256$ 时, 低流量状态下 (如 $\rho = 0.1$) 的 P_l 值接近于 10^{-7} 。由图 3(c) 可知, 在固定波长数目 ($W = 64$) 条件下, 随 \overline{w}_i 值的减小, 波带阻塞几率显著降低; 当 \overline{w}_i 从 10 减小至 3 时, 即便在低流量状态下 (如 $\rho = 0.1$), 对应的波带阻塞率在数值上亦有 3 个数量级的减少。



(a) $W=64, \overline{w}_i=3$



(b) $\overline{w}_i=3, \eta=20:80$



(c) $W=64, \eta=20:80$

图 3 DIA 机制下的阻塞特性

Fig. 3 Characteristics of blocking under DIA mechanism

设 $W = 64, \eta = 20 : 80$, 图 4 为静态分配 ($\eta = 50 : 50$)^[21]、VWGS^[16] 和 DIA 三者 $\overline{w}_i = 3$ 和 $\overline{w}_i = 7$ 条件下阻塞性能的比较结果。依据图 4 可知, 由于波带与波长信道固定, 在无波长/波带转换设备的条件下, 静态分配机制的阻塞性能可以精确地用 $M/M/1/1$ 模型描述。当 $\overline{w}_i = 3$

时,实际上相当于 32 信道/链路($W = 3 \times 16 + 16$) 波长路由网络;当 $\bar{\omega}_i = 7$ 时,则锐减为 8 信道/链路($W = 7 \times 8 + 8$) 网络。由于空闲波长的信道数目较少,导致网络在低流量状态时的阻塞率很高,当 $\rho=0.1$ 时,其 P_l 值已超过 10^{-2} 。对于 VWGS 而言,只有在链路内的空闲波长信道较多时($\rho < 0.3$),其阻塞性能才略优于静态机制;随着流量载荷增加,VWGS 的随机性使得核心节点的业务传输性能严重劣化,阻塞率始终高于 10^{-1} 。

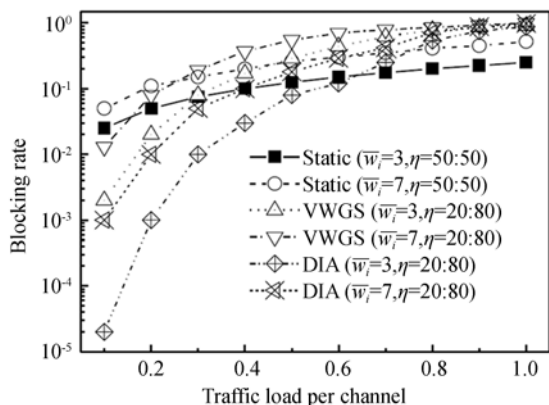


图 4 阻塞性能比较

Fig. 4 Comparison of blocking rate with different $\bar{\omega}_i$ and η

比较而言,在低流量状态时,由于波长、波带区域的隔离度高,且不同光纤链路内的波带信道按照正、逆序奇偶交错原则分配,DIA 机制使得波带业务间的信道竞争几率近似为“零”,网络的阻塞仅来自于波长业务间的竞争。当 $\rho = 0.1$ 时,其 P_l 值比静态机制大约降低了 3 个数量级。随着网络流量载荷的增加,带宽资源被迅速压缩,光纤链路内没有足够的信道来保证波带业务间的奇偶交错分配需求。此时,DIA 机制逐渐退化为 VWGS,导致核心交换节点内的信道阻塞率迅速升高。数值结果表明,在中低流量载荷区域内($\rho < 0.7$),DIA 机制下的网络阻塞性能仍优于静态分配机制,阻塞率降低约 50%。

依据文献[22],定义业务的平均边缘-边缘传输延迟(T_{e2e})为:

$$T_{e2e} = T_{assem} + T_{trans} + T_{disassem} + T_{offset} + P_l \cdot [T_{assem} + T_{trans} + T_{disassem} + T_{offset}], \quad (5)$$

其中: T_{assem} 和 $T_{disassem}$ 分别为聚合与解聚合时间, T_{trans} 为传输时间, T_{offset} 为偏置时间。显然,式(5)

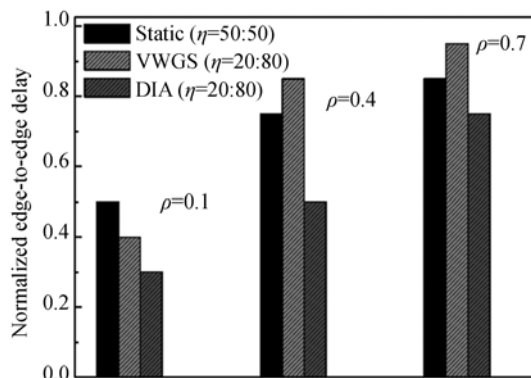


图 5 延迟阻塞性能比较

Fig. 5 Comparison of normalized edge-to-edge delay with different ρ and η

中的后半部分为“丢弃-重传”所导致的额外传输延迟。当 P_l 值较大时,对应的传输延迟将显著增加。设 $T_{assem} = T_{disassem}$, $W = 64$, 中低流量状态下的归一化边缘-边缘传输延迟(T_{e2e} / T_l) 如图 5 所示。

在图 5 中,低流量状态下,由于边缘聚合时间较多,静态分配的传输延迟最大;随着 ρ 的增加,VWGS 的传输延迟跃升最高,且持续快速增加;与之相比,DIA 的传输延迟始终保持最低,且增幅较缓。当 $\rho = 0.1$ 和 0.7 时,归一化边缘-边缘延迟比 VWGS 减少约 25%;当 $\rho = 0.4$ 时,延迟减少达 40%。结合图 4 中的结果可知,VWGS 的传输延迟增加与其信道分配随机性所导致的高丢弃率及引发大量的“丢弃-重传”直接相关。严格的传输控制协议(TCP)是保证网络传输效率的关键^[23]。相比之下,DIA 则由于较低的波带、波长阻塞几率避免了大量数据包不必要的“丢弃-重传”过程,使得丢弃与延迟性能得以同步提升。

4 结 论

光纤链路的波长信道资源与波带的平均子波长数目直接影响混合光交换网络的阻塞性能。DIA 机制在 VWGS 方案基础上,通过规范链路内部的波带、波长分配原则,结合“奇/偶”及“正/逆序”波长聚合策略,有效降低了不同边缘节点间业务在核心交换节点的碰撞几率。与 VWGS 相比,阻塞率在整个流量状态范围内均得到不同程度的改善,在低流量区域的阻塞率达 10^{-5} ,改善程度接近 3 个数量级。同时,由于避免了大量业务

因丢弃而导致的重传,平均边缘-边缘延迟亦减少 25%~40%。此外,考虑到核心节点无需波长转

换及光缓存,DIA 机制运行下的混合光交换网络将具有更高的能耗与成本优势。

参考文献:

- [1] 马松威,郭秉礼,陈新,等. 弹性光网络中基于效用的公平性感知动态频谱分配方案[J]. 光子学报, 2014, 43(7): 0706006.
MA S W, GUO B L, CHEN X, *et al.*. A utility-based fairness aware dynamic spectrum allocation scheme in elastic optical networks [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(7): 0706006.
- [2] 崔宁,陈兴林,曹开锐,等. 空间光通信跟踪系统的模糊自抗扰控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1394-1400.
CUI N, CHEN X L, CAO K R, *et al.*. Fuzzy active disturbance rejection control of fine tracking system for free space optical communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1394-1400. (in Chinese)
- [3] 王旭东,冯海燕,吴楠,等. 并行翻转-正交频分复用调光控制室内可见光通信系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 85-91.
WANG X D, FENG H Y, WU N, *et al.*. PF-OFDM dimming control for indoor visible light communication systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 85-91. (in Chinese)
- [4] 吴维农,胡新. 一种改进的电力光纤到户解决方案[J]. 电力系统通信, 2012, 33 (239): 34-37.
WU W N, HU X. An improved solution of power fiber to the home [J]. *Telecommunications for Electric Power System*, 2012, 33 (239): 34-37. (in Chinese)
- [5] 朱智俊,乐孜纯. 光突发交换中的一种自适应汇聚策略[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 248-256.
ZHU ZH J, LE Z CH. Adaptive assemble strategy for optical burst switching networks [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 248-256. (in Chinese)
- [6] 杨九如,王晓飞,柳春郁,等. 基于流量门限的提前预留竞争解决机制[J]. 光子学报, 2014, 43(7): 0706019.
YANG J R, WANG X F, LIU CH Y, *et al.*. Pre-reservation based traffic threshold for contention resolution in differentiated optical burst switching networks [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43 (7): 0706019. (in Chinese)
- [7] WANG X, GUO L, WEI X, *et al.*. Survivability in waveband switching optical networks: Challenges and new ideas [J]. *Computer Communications*, 2008, 31: 2039-2046.
- [8] ZERVAS G, LEENHEER M, SADEGHIOON L, *et al.*. Multi-granular optical cross-connect: design, analysis, and demonstration [J]. *Journal of Optical Communication and Networking*, 2009, 1 (1): 69-83.
- [9] TACHIBANA T, NASSAR B, KASAHARA S. Hop-based burst-cluster transmission: Fairness improvement in high-performance OBS networks [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, 3(6): 542-552.
- [10] WANG Y, CAO X, CACIULA A, *et al.*. Batch scheduling in optical networks [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(2): 116-126.
- [11] CAO X, VISHAL A, QIAO C. Waveband switching for dynamic traffic demands in multigranular optical networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2007, 15(4): 957-968.
- [12] HIDEKI T, SHINJI T, KOSO M. Coupled-layer type waveband path design method corresponding to traffic demand fluctuation [J]. *Computer Communications*, 2007, 30: 965-974.
- [13] FOK M, LEE K, SHU C. Waveband-switchable SOA ring laser constructed with a phase modulator loop mirror filter [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(7): 1393-1395.
- [14] LI M, RAMAMURTHY B. Heterogeneous waveband switching in wavelength division multiplexed networks based on autonomous clustering architecture [J]. *Journal of Optical Networking*, 2006, 5 (9): 667-680.
- [15] GUO L, WANG X, JI W, *et al.*. A new waveband switching method for reducing the number of ports in wavelength-division-multiplexing optical networks [J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, 15: 5-9.
- [16] CHARCRANOON S, ELBAWAB T, SHIN J, *et al.*. Group-scheduling for optical burst switched (OBS) networks [J]. *Photonic Network Commu-*

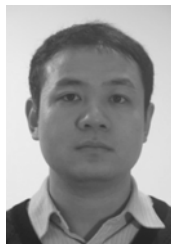
- nications, 2006, 11: 99-110.
- [17] TURNER J. Terabit burst switching [J]. *Journal of High Speed Networks*, 1999, 8(1): 1-17.
- [18] KLEINROCK L. *Queueing systems I* [M]. New York: Wiley Publishing Press, 1975: 80-95.
- [19] IZMAILOV R, GANGULY S, KLEPTSYN V, *et al.*. Non-uniform waveband hierarchy in hybrid optical networks [J]. *International Conference on Computer Communications, San Francisco: INFOCOM*, 2003: 1344-1354.
- [20] LI M, YAO W, RAMAMURTHY B. Same-destination-intermediate grouping vs. end-to-end grouping for waveband switching in WDM mesh networks [C]. *International Conference on Communications*, Seoul: ICC, 2005: 1807-1812.
- [21] 杨九如, 柳春郁, 常金龙, 等. 光突发交换网络能耗有效性研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(7): s105001.
- YANG J R, LIU CH Y, CHANG J L, *et al.*. Energy efficiency research of optical burst switching networks [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(7): s105001. (in Chinese)
- [22] 李俊杰, 张汉一, 周炳琨, 等. 动态业务条件多粒度交换光网络性能研究 [J]. *电子学报*, 2003, 31(11): 1613-1617.
- LI J J, ZHANG H Y, ZHOU B K, *et al.*. Performance evaluation of multi-granularity switching optical networks under dynamic traffic conditions [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(11): 1613-1617. (in Chinese)
- [23] HOU R, HE T T, LEI J, *et al.*. A framework of prioritized burst segmentation supporting controlled retransmission in OBS networks [J]. *AEU-International Journal Electronics Communication*, 2014, 68(1): 44-50.

作者简介:



柳春郁(1975—),男,黑龙江海林人,博士,副教授,2011年于黑龙江大学获得博士学位,主要从事光纤通信与光纤传感技术方面的研究。E-mail: liuchunyu@hlju.edu.cn

通讯作者:



杨九如(1978—),男,黑龙江牡丹江人,博士,教授,2008年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事光交换网络、光纤通信、光纤及波导有源器件的研究。E-mail: yangjr@hlju.edu.cn