

doi: 10. 3788/gzxb20124103. 0271

密集波分复用条件下的光轨网络串扰分析与仿真

张蕾蕾, 付明磊, 乐孜纯

(浙江工业大学 理学院, 杭州 310023)

摘 要:光轨网络是一种能够利用成熟的光学器件实现带宽灵活分配和信息交换的新型网络. 串扰是限制光轨网络的物理层性能及其扩展性的重要因素. 本文讨论了典型的光轨网络节点中异频串扰和同频串扰的产生原因, 理论分析了两者对光轨网络的物理层传输性能的影响. 给出了 3 种串扰性能的评价方法. 以密集波分复用技术为应用背景, 分别搭建了器件隔离度为 20 dB 和 30 dB 的、具有 3 个节点 5 个波长且单波长速率为 2.5 Gbps 的光轨网络, 仿真了串扰在光轨网络中的传播过程, 并计算了光轨网络的误码率、功率代价和相对串扰. 理论分析和仿真结果表明: 光滤波器、解复用器和复用器是光轨网络中串扰产生的关键器件, 且提高器件的隔离度等性能对于提高光轨网络的传输性能会有较显著的效果; 在密集波分复用条件下, 串扰对单波长速率为 2.5 Gbps 的光轨网络的误码率和功率代价具有显著的影响, 从而限制了光轨网络实际可用的节点数目.

关键词:光轨; 串扰; 密集波分复用; 仿真

中图分类号: TN929

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)03-0271-6

0 引言

近年来, 随着 IP 分组业务的快速发展, 传统的基于电交换技术的传输网络已经不再适合当前业务的应用需求. 基于光交换技术的传输网络已经引起学术界和产业界的广泛关注, 其中光轨网络是目前光网络领域的研究热点^[1-5]. 光轨(Light Trail, LT)是 Gumaste 等在 2003 年提出的一种光总线概念, 它是在多个网络节点间建立的一条单向光通道, 采用时分复用的方式进行数据传输, 以及采用空分复用的方式进行业务量疏导, 并且在上述过程中无需对光开关等交换设备进行重新配置^[5]. 光轨网络利用当前成熟的光学器件和网络技术, 可以提供比特及协议的透明传输, 具有支持多播技术和子波长调度、建设成本低, 尤其是能良好地适应 IP 业务传输等优势.

目前在光轨网络领域, 绝大多数研究工作集中在光轨系统网络层面的性能设计与优化, 如媒质接入控制(Media Access Control, MAC)协议、资源调度与业务量疏导算法、路由算法等^[6-10]. 但是, 很少有针对光轨网络节点结构及其物理层性能分析方面的文献报道.

本文在前期研究工作的基础上^[11], 选择典型光

轨网络节点结构中的串扰问题作为研究对象, 并分析串扰的存在及其累积效应对光轨物理层传输性能的影响. 首先, 针对典型光轨节点的器件结构, 发现光滤波器、解复用器和复用器是引起光轨网络串扰的主要器件; 其次, 对光轨节点中的串扰类型进行理论分析与比较, 发现光轨节点中的异频串扰和同频串扰是同时存在的, 且同频串扰对节点的性能影响更大. 最后, 采用专业的光通信系统仿真软件构架了密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)条件下具有 3 个节点, 5 个波长的光轨网络, 并且根据仿真数据计算得出了光轨网络的误码率、功率代价和相对串扰等性能指标.

1 典型的光轨网络节点结构

图 1 为一个典型的光轨节点交换单元结构, 主

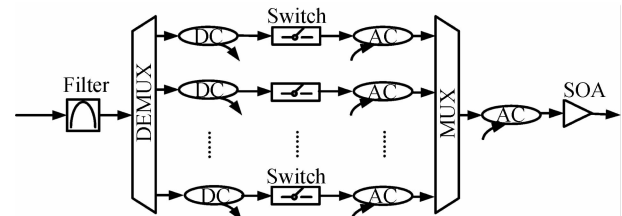


图 1 光轨网络节点的典型结构

Fig. 1 Typical structure of the light-trail node

基金项目:国家自然科学基金(No. 61172081)、浙江省公益性技术应用研究计划(No. 2011C21011)和浙江工业大学自然科学基金(No. 2011XY027)资助

第一作者:张蕾蕾(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信系统性能分析. Email: leileizhang1023@126.com

责任作者/导师(通讯作者):乐孜纯(1965-), 女, 教授, 主要研究方向为微结构光电子器件. Email: lzc@zjut.edu.cn

收稿日期:2011-09-28; **修回日期:**2012-01-18

要包括光滤波器、解复用器、下路耦合器、光开关、上路耦合器、复用器、控制信号上路耦合器以及半导体光放大器^[5]。

首先,光滤波器从波分复用光信号中滤出光服务信道(Optical Service Channel, OSC)波长,并将其传输到控制波长接收机,其余的数据波长经过解复用后通过下路耦合器来实现单路波长的下路功能.光开关在控制单元的控制下实现单路波长的通/断.上路的数据波长经过上路耦合器后进入复用器. OSC 波长也同样通过控制信号上路耦合器进入到光纤传输.最后,波分复用光信号由半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)放大,经过光纤传输到下一节点.光轨网络节点的特殊结构使得它能够一条已经建立好的光通道上分别传输多个节点的信息,并且最小化信息传输过程所需要的光开关的切换次数,从而提供了一种实现高速光交换网络的可选方案.

2 光轨网络串扰产生原因与理论分析

2.1 引起光轨网络串扰的原因

在基于 DWDM 技术的光轨网络中,由于光轨节点中的复用器/解复用器、可调谐光滤波器等器件性能的不完善性,相邻波长信道之间会产生串扰,从而影响系统的传输性能.从频率的角度分析,串扰主要可以分为异频串扰和同频串扰.异频串扰是指串扰信号的频率落在主信号中的频带外,这种串扰可

以用窄带滤波器滤掉,一般来说它对系统的影响较小.同频串扰是指串扰信号的频率在主信号频带内,这种串扰不能用滤波器滤掉,因而会在网络中积累,接收时会产生比特噪声^[12-15].

若忽略光纤传输的损耗、色散以及非线性效应等因素的影响,在图 1 所示的典型光轨网络节点中,由于波长选择器——滤波器、复用器、解复用器等器件性能的不完善性,如器件隔离度过低,相邻波长信道之间将会产生异频串扰,如图 2 和图 3 所示,这种串扰是一种加性串扰,即表现为在信号上叠加了一定功率的噪音,恶化了信号的消光比.

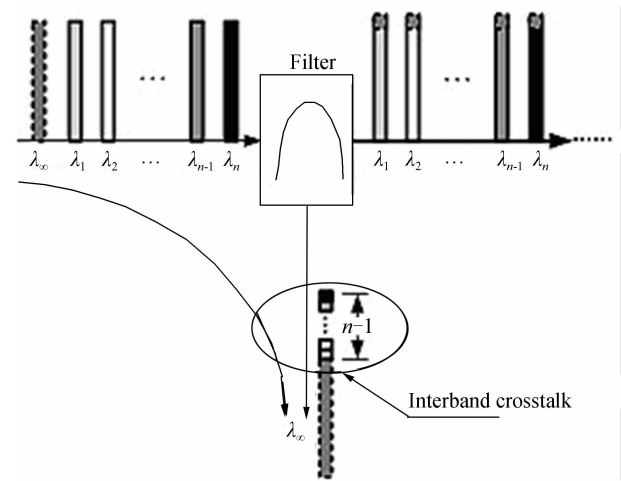


图 2 光滤波器引起的异频串扰
Fig. 2 Interband crosstalk induced by optical filter

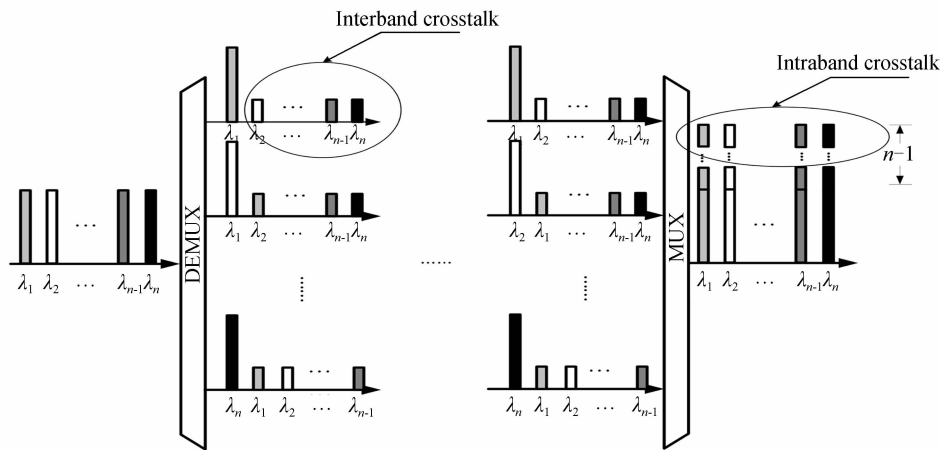


图 3 复用器/解复用器引起的同频串扰
Fig. 3 Intraband crosstalk induced by MUX/DEMUX

此外,以 λ_1 为例,如图 3 所示,在光轨网络节点的解复用器中, λ_1 波长信号功率会泄露到其他波长信道中.并且这些与 λ_1 同源的噪音信号会在光轨网络节点的复用过程中引起光轨通信节点中的同频串扰,它是不同链路中相同波长间的串扰或同一信号与自身的串扰,会随着节点数的增加而不断积累,对系统造成更恶劣的影响.

2.2 串扰对光轨网络性能影响的理论分析

2.2.1 异频串扰对光轨网络性能的影响

定义在异频串扰条件下光轨网络节点中 λ_1 信道的输出功率为

$$P_{out}^1 = P_{in}^1 + \sum_{i=2}^n C_{demux} P_{in}^i + \sum_{i=2}^n C_{mux} [P_{in}^i + \sum_{i=2}^n C_{demux} P_{in}^i] \quad (1)$$

式中 P_{out}^i 表示波长信道 i 的输出功率; P_{in}^i 表示波长信道 i 的输入功率; C_{demux} 表示解复用器的串扰系数; C_{mux} 表示复用器的串扰系数. n 表示光轨节点中传输的信道数. 式(1)第一部分是 λ_1 信道的输入信号功率, 在不存在串扰和损耗等条件下, $P_{\text{out}}^1 = P_{\text{in}}^1$; 第二部分是由解复用器引起的异频串扰; 第三部分是由复用器引起的异频串扰. 式中假设: ①不考虑信号在器件传输过程中的插入损耗; ②以上串扰系数对所有波长的影响相同.

通常情况下器件隔离度和其串扰系数满足关系: $R_C = -10\lg C$, R_C 和 C 分别为波长选择器的隔离度和串扰系数. 由于一般器件的串扰系数大于 20 dB, 因此 C 的取值将小于 $1.0e-2$, 则式(1)简化为

$$P_{\text{out}}^1 = P_{\text{in}}^1 + \sum_{i=2}^n C_{\text{demux}} P_{\text{in}}^i + \sum_{i=2}^n C_{\text{mux}} P_{\text{in}}^i \quad (2)$$

2.2.2 同频串扰对光轨网络性能的影响

定义输入解复用器 λ_1 信道的光场强度^[12-15] 为

$$E_1(t) = \sqrt{2} E_1 d_1(t) \cos(\omega_1 t + \varphi_1(t)) \quad (3)$$

式中 E 表示波长信道的光场幅度, $d(t)$ 表示信号调制项, 当传输“1”码时, $d(t) = 1$; 当传输“0”码时, $d(t) = 0$. ω 表示信号光的角频率, $\varphi(t)$ 表示信号的相位噪音.

在复用器的输入端, 忽略串扰频移, $n-1$ 个同频串扰的光场强度为

$$E_i(t) = \sqrt{2} \sqrt{C_{\text{demux}}} E_i d_i(t) \cos(\omega_1 t + \varphi_i(t)) \quad (4)$$

$(i=2, \dots, n)$

那么, 进入 λ_1 信道的总光场强度为

$$E_{\text{total}}^1(t) = \sqrt{2} E_1 d_1(t) \cos(\omega_1 t + \varphi_1(t)) + \sum_{i=2}^n \sqrt{2} \sqrt{C_{\text{demux}}} E_i d_i(t) \cos(\omega_1 t + \varphi_i(t)) \quad (5)$$

所以, 复用器中 λ_1 信道输出端口的光功率为

$$P_{\text{out}}^1 = [E_{\text{total}}^1(t)]^2 / 2 = [\sqrt{2} E_1 d_1(t) \cos(\omega_1 t + \varphi_1(t)) + \sum_{i=2}^n \sqrt{2} \sqrt{C_{\text{demux}}} E_i d_i(t) \cos(\omega_1 t + \varphi_i(t))]^2 / 2 \quad (6)$$

将式(6)展开, 并略去高频分量 $2\omega_i$ 和 $\omega_i + \omega_j$ 项, 得

$$P_{\text{out}}^1 = [E_1 d_1(t)]^2 / 2 + [\sum_{i=2}^n C_{\text{demux}} E_i d_i(t)]^2 / 2 + \sum_{i=2}^n \sqrt{C_{\text{demux}}} E_1 E_i d_1(t) d_i(t) \cos(\varphi_1(t) - \varphi_i(t)) + \sum_{i=2}^n \sum_{j=i+1}^n C_{\text{demux}} E_i E_j d_i(t) d_j(t) \cos(\varphi_i(t) - \varphi_j(t)) \quad (7)$$

式(7)等号右边第一项表示 λ_1 波长信号功率; 第二项表示 $n-1$ 个同频串扰功率; 第三项表示 λ_1 波长信号与 $n-1$ 个同频串扰之间产生的拍频项功率; 第四项表示 $n-1$ 个同频串扰之间的拍频项功率. 比较式(2)和式(7), 可见同频串扰比非同频串扰

对光轨通信节点的性能影响程度大. 尤其是当 λ_1 波长信号与 $n-1$ 个同频串扰之间产生的拍频项功率对输出端口的功率影响权重最大.

3 光轨网络串扰的评价方法

3.1 误码率

串扰噪音致使系统误码率(Bit Error Rate, BER)升高, 当不存在串扰噪音时, 系统仅存在接收机的热噪音, 假设热噪音满足高斯分布, 则存在于光通信网络系统的拍噪音的误码率^[11] 公式可以表示为

$$\text{BER} = \frac{1}{4} \text{erfc} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_{s_1} - I_D}{\sigma_1} \right) + \frac{1}{4} \text{erfc} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_D - I_{s_0}}{\sigma_0} \right) \quad (8)$$

式中 I_{s_1} 、 I_{s_0} 分别为“1”码和“0”码时的探测器电流, I_D 为判决门限; σ_1 、 σ_0 表示没有差拍噪音时接收机端“1”码和“0”码的噪音, 它们主要由接收机的热噪音决定, 定义 $\sigma_1 = \sigma_0$, $I_{s_0} = 0$.

当信道数较多时, 必须考虑同频串扰对系统性能的影响, 考虑同频串扰后误码率可以修正为

$$\text{BER} = \frac{1}{4} \text{erfc} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_{s_1} - I_D}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_{\text{RIN}}^2 I_{s_1}^2}} \right) + \frac{1}{4} \text{erfc} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_D - I_{s_0}}{\sqrt{\sigma_0^2}} \right) \quad (9)$$

式中, σ_{RIN}^2 为归一化噪音功率. 若 I_D 为固定判决门限, 则 $I_D = (I_{s_0} + I_{s_1})/2$; 若 I_D 为最佳判决门限, 则 $I_D = I_{s_1} \sigma_0 / (\sigma_0 + \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_{\text{RIN}}^2 I_{s_1}^2})$.

又由于存在串扰时的 Q 因子、不存在串扰时的 Q' 因子和“1”码和“0”码时的探测器电流、接收机端噪音以及归一化噪音功率满足

$$Q = \frac{I_{s_1} - I_{s_0}}{2 \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_{\text{RIN}}^2 I_{s_1}^2}}, Q' = \frac{I_{s_1} - I_{s_0}}{2 \sigma_0},$$

则固定判决门限时式(9)可化简为

$$\text{BER} = \frac{1}{4} \text{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) + \frac{1}{4} \text{erfc} \left(\frac{Q'}{\sqrt{2}} \right) \quad (10)$$

同样, 最佳判决门限时 BER 可以约化简为

$$\text{BER} = \text{erfc}(\sqrt{2}Q)/2 \quad (11)$$

3.2 功率代价

定义功率代价(Power Penalty, PP)^[11] 为达到某一误码率指标, 存在串扰时所需的最小接收光功率 P 与不存在串扰时所需的最小光功率 P_s' 的比值的分贝数, 即

$$PP = 10 \lg(P_s / P_s') \quad (12)$$

在固定判决门限下的功率代价可以表示为

$$PP = 10 \lg \frac{P_s}{P_s'} = 10 \lg \frac{Q'}{Q} - 5 \lg[1 - 4\sigma_{\text{RIN}}^2 Q'^2] \quad (13)$$

同样,最佳判决门限下的功率代价可表示为

$$PP = 10 \lg \frac{P_s}{P_s^*} = -10 \lg(1 - \sigma_{\text{RIN}}^2 Q^2) \quad (14)$$

3.3 相对串扰

对于波长信道 i , 它的相对串扰 C^i [13] 定义为

$$C^i = \left| \frac{P_{\text{out}}^{\text{all channels}} - P_{\text{out}}^i}{P_{\text{out}}^i} \right| \quad (15)$$

式(15)中, $P_{\text{out}}^{\text{all channels}}$ 表示光轨网络节点中所有信道满载时, 波长信道 i 的输出功率; P_{out}^i 表示只有波长信道 i 工作时, 波长信道 i 的输出功率. 因此, 相对串扰可以理解为: 由于串扰的存在, 满负载系统和单负载系统运行情况的相差程度.

4 光轨网络节点串扰的仿真

4.1 仿真系统的场景

利用专业通信系统仿真软件, 以波长间隔为 2 nm 的 DWDM 系统为背景, 通过给光轨节点中的主要器件设置不同的串扰参量, 搭建了一个具有 3 个节点, 5 个波长光轨网络系统. 其中, 1 个波长用于传输 OSC 信息, 4 个波长用于传输数据信息. 仿真平台中的具体光学参量设定如下: 光发射机的初始光功率为 0 dBm, 消光比为 10 dB, 线宽为 10 MHz, 调制码型为 RZ; 光滤波器类型为声光调谐滤波器, 带宽为 100 GHz, 插入损耗为 0.5 dB; 解复用器的带宽为 10 GHz, 插入损耗为 2 dB, 滤波类型为 2 阶贝塞尔滤波器; 复用器的参量设置与解复用器一致; 传输采用标准单模光纤, 单个节点的链路长度为 33 km, 衰减系数和色散系数分别为 0.2 dB/km 和 16 ps/(nm · km), 色散补偿光纤的衰减系数和色散系数分别为 0.3 dB/km 和 -160 ps/(nm · km), 节点间光纤长度为 30 km, 色散补偿光纤长度为 3 km, 整个系统传输的码速为 2.5 Gbps, 其他参量均采用软件默认值.

仿真过程中, 对光轨系统进行了色散补偿性能的优化, 尽可能消除由色散引起的光轨网络性能下降. 针对在不同器件隔离度下搭建的多个节点级联的光轨通信系统, 测试了传输过程中的光信号功率、噪音功率、接收机端的误码率以及 Q 因子等参量.

4.2 串扰对光轨网络接收端 BER 的影响

通过光轨网络仿真系统的 BER 分析仪, 得到光轨网络中 BER 仿真结果, 同时, 通过式(10)和(11), 计算得到固定判决门限(Fixed Decision Threshold, FDT) 和最佳判决门限(Optimum Decision Threshold, ODT)下的接收机端的理论 BER 值.

对 3 个节点级联的光轨网络进行了仿真, 其中 BER 结果如图 4(a). 首先, 观察到器件隔离度 (R_c)

对于 BER 具有重要影响. 其次, 仿真结果与 FDT 理论计算结果接近, 因此优化光轨网络接收机的性能对于降低 BER 具有较明显的效果. 最后, 1 548 nm 和 1 550 nm 波长的 BER 较低, 尤其是在 $R_c = 20$ dB 时, 1 550 nm 波长的 BER 为 1.25×10^{-16} . 作为对比, 对 4 个节点级联的光轨网络进行了仿真, 其中 BER 结果如图 4(b). 与图 4(a) 不同的是, 1 548 nm 波长的 BER 恶化严重, 并且 1 548 nm 和 1 550 nm 波长的 BER 均高于光通信系统的最低 BER 要求 ($\text{BER} < 1 \times 10^{-9}$).

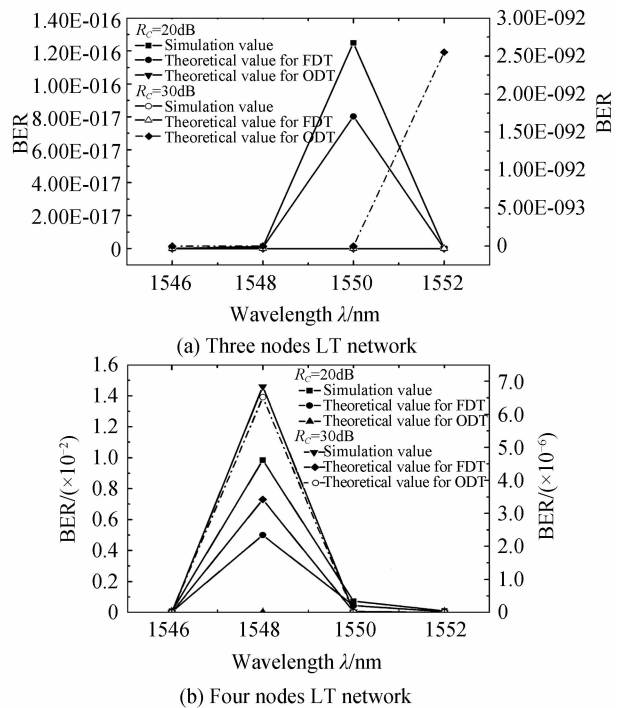
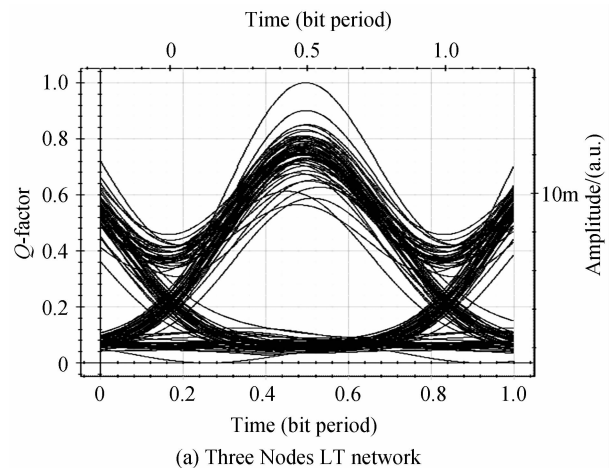


图 4 DWDM 条件下 3 和 4 节点光轨网络的 BER
Fig. 4 BER of the three and four nodes LT network at the scenario of DWDM

因此, 仿真结果表明: 在 DWDM 条件下, 传输间隔为 33 km, 单波长传输速率为 2.5 Gbps 的光轨网络只能保证 3 个节点的通信距离.

图 5 是 3 个节点和 4 个节点光轨网络中 1 550 nm



(a) Three Nodes LT network

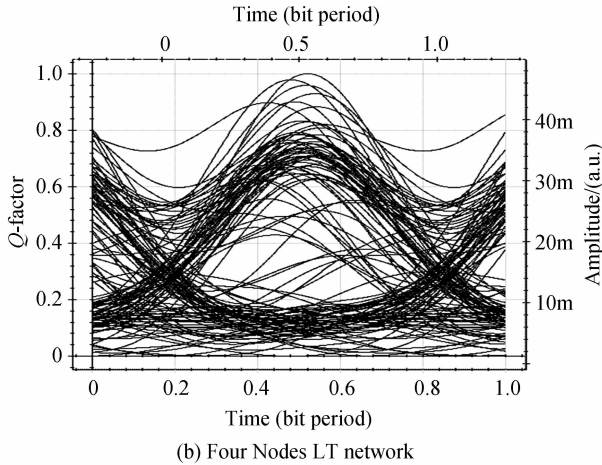


图 5 DWDM 条件下 3 和 4 节点光轨网络中 1 550 nm 信道的眼图

Fig. 5 Eye Diagram of the three and four nodes LT network for 1 550 nm channel at the scenario of DWDM

波长在接收端的眼图. 两张眼图直观地表示了光轨网络接收端的码间干扰. 因此, 串扰是限制光轨网络扩展性的重要因素.

4.3 串扰对光轨网络功率代价的影响

通过统计仿真数据中的信号功率和噪音功率计算出了归一化的平均噪音功率, 并且根据式(13)和式(14)计算得到固定判决门限下和最佳判决门限下的功率代价.

如图 6 所示, 在 DWDM 条件下, 3 个节点的光轨网络在器件隔离度为 20 dB 时, 固定判决门限下的功率代价平均值为 10.37 dB; 最佳判决门限下的功率代价平均值为 0.19 dB. 器件隔离度为 30 dB 时, 固定判决门限下的功率代价平均值为 9.78 dB, 最佳判决门限下的功率代价平均值为 0.03 dB. 仿真结果表明: 由于串扰的存在, 光轨网络中接收机端信号实际光功率恶化程度较高, 功率代价大.

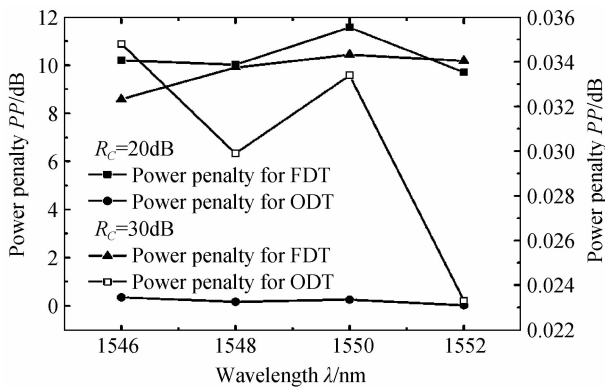


图 6 不同隔离度下 3 节点光轨网络功率代价

Fig. 6 Power Penalty of the 3 nodes LT network at the scenario of different isolation

4.4 光轨网络的相对串扰评价

将光滤波器的隔离度设置为 35 dB, 解复用器和复用器的隔离度设置为 40 dB 的条件下, 测试得

到单个光通道的输出功率作为没有串扰条件下的光功率 P_{out}^i ; 将光滤波器、解复用器和复用器的隔离度设置为 20 dB 的条件下, 测试得到满载光通道的输出功率作为存在串扰条件下的光功率 $P_{out20}^{all\ channels}$; 将光滤波器、解复用器和复用器的隔离度设置为 30 dB 的条件下, 测试得到满载光通道的输出功率作为存在串扰条件下的光功率 $P_{out30}^{all\ channels}$, 并且根据式(15)计算出 DWDM 条件下的相对串扰, 如图 7.

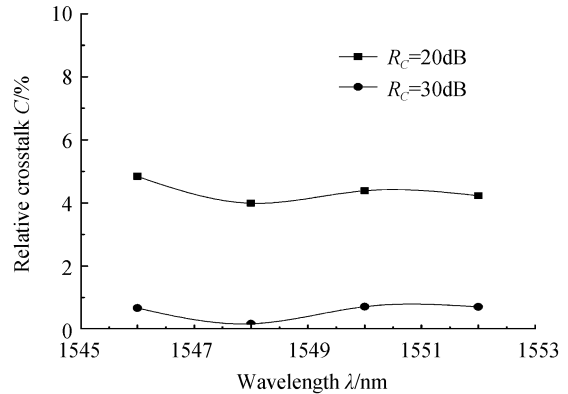


图 7 DWDM 条件下 3 节点光轨网络的相对串扰

Fig. 7 Relative crosstalk of the 3 nodes LT network at the scenario of DWDM

图 7 中, 在 DWDM 条件下, 器件隔离度为 20 dB 时, 3 个节点各个信道平均相对串扰为 4.36%; 器件隔离度为 30 dB 时, 3 个节点各个信道平均相对串扰为 0.57%. 仿真结果进一步验证: 光滤波器、解复用器和复用器的器件性能是引起光轨网络串扰产生的关键因素.

5 结论

光轨网络是一种能够利用现有成熟的光学器件实现高速光交换的新型网络. 我们对典型光轨网络节点中串扰的产生原因及其对物理层传输性能的影响进行了理论分析, 以及对 DWDM 条件下具有 3 个节点, 5 个波长且单波长传输速率为 2.5 Gbps 的光轨网络进行了仿真. 这种分析方法可以扩展应用到其他类型的光轨网络节点. 理论分析和仿真结果表明: 1) 光滤波器、解复用器和复用器的器件性能是引起光轨网络串扰的主要因素, 因此提高器件的隔离度对于光轨网络的性能改善有较显著的效果. 2) 在光轨网络节点中, 异频串扰和同频串扰是同时存在的, 后者对节点性能的影响更加明显. 3) 串扰对光轨网络的误码率和功率代价有显著的影响, 严重限制了光轨网络的传输节点数目. 在光轨网络的实用化过程中, 我们认为: 采用光子集成技术提高光轨网络节点的集成度和传输性能是解决光轨网络串扰问题的有效方法.

参考文献

- [1] CHEN Cun-kang, QIAO Yao-jun, JI Yue-feng. Dynamic bandwidth allocation algorithm for orthogonal frequency division multiplexing access-passive optical network[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5): 684-689.
陈存康, 乔耀军, 纪越峰. 基于正交频分复用无源光网络的动态带宽分配算法研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(5): 684-689.
- [2] ZHOU Xian-wei, WU Qi-wu, WANG Jian-ping, *et al.* An efficient secure lightpath establishment protocol in ASON[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2071-2076.
周贤伟, 吴启武, 王建萍, 等. 一种高效的 ASON 安全光路建立协议[J]. 光子学报, 2009, **38**(8): 2071-2076.
- [3] CHEN Tao, LIANG Zhong-cheng, XU Ning, *et al.* Novel space optical switch device of optofluidic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 797-801.
陈陶, 梁忠诚, 徐宁, 等. 新颖的微流控电调谐空间光开关. 光子学报, 2010, **39**(5): 797-801.
- [4] DING Ying, TONG Shou-feng, DONG Ke-yan, *et al.* Study and simulation of atmospheric UV communication performance with vertical transmitter-receiver[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 797-801.
丁莹, 佟首峰, 董科研, 等. 大气信道对垂直收发模式紫外光散射通信性能影响的仿真[J]. 光子学报, 2010, **39**(10): 1851-1856.
- [5] GUMASTE A, CLAMTAC I. Light-trails: a novel conceptual framework for conducting optical communications [C]. Torino: Workshop on High Performance Switching and Routing, IEEE, 2003: 251-256.
- [6] GUMASTE A, ZHENG Si-qing. Next-generation optical storage area networks: the light-trails approach[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, **43**(3): 72-79.
- [7] VANDERHORN N A, BALASUBRAMANIAN S, MINA M, *et al.* Light-trail testbed for IP-centric applications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, **43**(8): S5-S10.
- [8] GUMASTE A, GHANI N, BAFNA P, *et al.* DynaSPOT: dynamic services provisioned optical transport test-bed-Achieving multirate multiservice dynamic provisioning using strongly connected light-trail (SLiT) technology[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(1-4): 183-195.
- [9] LUO Xu-bin, WANG Bin. On service provisioning using light-trails in WDM optical networks with waveband switching[J]. *Photonic Network Communications*, 2011, **21**(1): 97-105.
- [10] ZHANG Wei-yi, KANDAH F, WANG Chong-gang, *et al.* Dynamic light trail routing in WDM optical networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2011, **21**(1): 78-89.
- [11] LE Zi-chun, HOU Ji-bin, FU Ming-lei, *et al.* Design and performance analysis of the node architecture for light-trail network[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(12): 3037-3043.
乐孜纯, 侯继斌, 付明磊, 等. 光轨网络节点结构设计及性能分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(12): 3037-3043.
- [12] RAMASWAMI R, SIVARAJAN K N. Optical networks: A practical perspective[M]. LE Zi-chun, transl. Beijing: China Machine Press, 2004: 204-209.
马斯瓦米 R, 西华拉占 K N. 光网络上卷: 光纤通信技术与系统[M]. 乐孜纯, 译. 北京: 机械工业出版社, 2004: 204-209.
- [13] ZHAO Liang, TANG Di-fang. Crosstalk of OXC in WDM-based all-optical network [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2007, **5**: 1-5.
赵亮, 唐隽芳. WDM 全光网 OXC 节点串扰效应分析[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2007, **5**: 1-5.
- [14] CHEN Zhen-jie, YU Chong-xiu. Intraband crosstalk in WDM networks[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(1): 22-26.
程振杰, 余重秀. WDM 网中同频串扰的研究[J]. 光子学报, 2001, **30**(1): 22-26.
- [15] FENG Jian-he, JI Yue-feng, GUAN Ke-jian, *et al.* Experimental study of incoherent crosstalk in WDM optical network[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2001, **22**(5): 6-10.
冯建和, 纪越峰, 管克俭, 等. WDM 光网络非相干串扰实验研究[J]. 通信学报, 2001, **22**(5): 6-10.

Crosstalk Analysis and Simulation of the DWDM Based Light-trail Networks

ZHANG Lei-lei, FU Ming-lei, LE Zi-chun

(College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Light-trail network is a novel optical network which takes advantage of mature optical devices to assign the bandwidth and switch the packets flexibly. Crosstalk is an important factor to restrict the performance at the physical layer as well as the extensibility of the light-trail network. Firstly, the causes of both interband crosstalk and intraband crosstalk in the typical light-trail nodes are discussed. In addition, the influence of the two kind's crosstalk on the transmission performance at the physical layer is theoretically analyzed. Secondly, three methods to evaluate the crosstalk are introduced. On the basis of DWDM technique, a simulation platform with 3 nodes and 5 wavelengths is built, in which the optical devices are assigned optical depth as 20 dB and 30 dB. And the basic transmission rate of the wavelength is 2.5 Gbps. At last, the propagation process of the crosstalk is traced in the whole light-trail network. And the BER, the power penalty and the relative crosstalk are calculated accordingly. Both analytical and simulation results show that optical filter, demultiplexer and multiplexer are the key optical devices which cause crosstalks. Hence, the transmission performance of light-trail network can be enhanced obviously by improving the depth of the above optical devices. Moreover, both BER and power penalty are observed to be affected deeply by the crosstalk when the basic transmission rate of single wavelength is up to 2.5 Gbps. Therefore, the number of optical node available is limited at the scenario of DWDM.

Key words: Light trail; Crosstalk; Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM); Simulation