

文章编号: 0258-7025(2010)07-1777-07

IP over WDM 网络中动态 IP 流量对非线性效应的影响

梅君瑶¹ 何舟^{1,2} 王传彪¹ 李蔚¹

(¹ 华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074
² 武汉邮电科学研究院光纤通信技术和网络国家重点实验室(筹), 湖北 武汉 430074)

摘要 研究了 IP over WDM 网络中 IP 业务流量的突发性对底层光脉冲传输的影响。突发的 IP 业务流量使 WDM 网络中传输信号的信道数目服从泊松分布, 在非线性薛定谔方程(NLSE)的基础上进行 IP 流量分析, 通过数值计算, 考查了 IP 业务流量对四波混频(FWM)和交叉相位调制(XPM)的综合影响, 得到了不同输入光功率、不同流量负荷下的眼图。结果表明, 40 信道的 WDM 网络中, 当输入信号光功率大于 5 dBm 时, IP 流量负荷的改变将会对网络性能产生剧烈的影响。同时, 通过公式计算出 FWM 功率、比特误码率与输入光功率、流量负荷、信道间隔的关系, 突出强调了不同信道分布对探测信道 FWM 效应的不同影响。

关键词 IP over WDM 网络; IP 业务流量; 四波混频噪声功率; 交叉相位调制; 眼图

中图分类号 O437; TN915 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103707.1777

Influence of Dynamic IP Traffic on the Combined Nonlinear Effects in IP over WDM Networks

Mei Junyao¹ He Zhou^{1,2} Wang Chuanbiao¹ Li Wei¹

(¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
² State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The influence of IP bursty traffic on combined nonlinear effects of cross phase modulation (XPM) and four-wave mixing (FWM) in IP over WDM networks is investigated by analyzing the Poisson distributed IP traffic based on the nonlinear Schrödinger equation (NLSE). Taken combined nonlinear effects into account, at the receiver, different eye diagrams with different input light powers and different IP traffic loads are obtained. From the numerical calculation results, when the input light power per channel is bigger than 5 dBm with 40 channels of WDM networks, the effect of IP bursty traffic will distort eye diagrams drastically. Furthermore we figure out the FWM power with different IP traffic loads, different input light powers and frequency spacings. FWM power with different wavelength settings is especially emphasized. From the FWM power distribution, we could quantitatively analyze which channels cross the probe channel seriously through FWM effect.

Key words IP over WDM networks; IP traffic; four-wave mixing noise power; cross phase modulation; eye diagrams

1 引言

不断涌现出的新的视频通信应用等使 Internet

网络的流量每 4~6 个月就要翻一番, 从而使网络带宽面临着极大的挑战^[1]。同时, 波分复用(WDM)

收稿日期: 2009-12-14; 收到修改稿日期: 2010-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(60772013)和国家 973 计划(2010CB328300, 2010CB328305)资助课题。

作者简介: 梅君瑶(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光传输网络技术等方面的研究。Email: junyaomei@gmail.com

导师简介: 李蔚(1968—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信技术和器件等方面的研究。

Email: weilee@hust.edu.cn(通信联系人)

技术发展十分迅猛,单波长传输速率商用已经达到 40 Gbit/s,100 Gbit/s已在试验中,复用波长数已突破 256 个^[2]。IP 数据业务对带宽的巨大需求和 WDM 系统对带宽的巨大供给促成了 IP 网络与 WDM 光网络的结合。因此,如何将 IP 网络与 WDM 光网络有效地结合起来,以及如何有效地控制该网络已成为当前研究的热点^[3]。

IP over WDM 网络需要解决 IP 层与 WDM 层间的适配和传输链路管理问题,并进一步解决如何保证网络可靠性和服务质量(QoS)的问题。由于光网络物理结构的特殊性,比如传输光纤上的色散、非线性等导致的信号传输损伤以及对链路上传输流量的限制,使得作为网络管理与控制关键技术的节点管理技术在进行路由与波长分配(RWA)时必须考虑物理层的特性,以保证网络的可靠性与服务质量。一般来讲,一旦网络的物理结构固定下来,网络的性能也随之确定,每条链路的性能可通过测量获得。实际上现有的网络中由于动态网络业务的随机性、信道负载的不确定性使光纤中传输的波长信道数量、功率等随着业务流量随机变化,从而通过改变光纤的非线性效应如四波混频(FWM)和交叉相位调制(XPM)等影响物理层的传输。这样导致底层物理传输性能不但依赖于物理链路,还与 IP 负载有关。如果能够事先在节点处考虑 IP 业务流量的影响,利用数值仿真的方法对光信号在不同的网络链路中的传输情况进行数值计算,最后对物理层的传输特性进行评估,这样就可以实现对候选光路进行传输损伤的评估,提高网络的整体性能。

文献[4]分析了基于通用多协议标签交换协议(GMPLS)的密集波分复用(DWDM)网络中,IP 业务流量对物理层的受激拉曼散射(SRS)和 XPM 的影响;文献[5]则研究了 WDM 环形网络中,IP 业务流量通过 FWM 效应和 SRS 对网络性能的影响;还有一些论文就 IP 流量对网络性能,如比特误码率(BER)^[6,7]和 FWM 功率随时间的分布^[7]给出了详细的分析和数学表达式。到目前为止,大部分研究工作都是单独考虑 IP 业务流量通过某一项非线性效应对网络性能的影响。但在 IP over WDM 网络中,需要得出的是物理层——光路综合传输损伤的评估,从而优化 RWA 算法,提高网络的整体性能。本文从光纤非线性效应中的 FWM 出发,研究 IP 业务流量基于此对底层物理传输的影响,突出了不同信道分布对探测信道的影响不一样,从而为优化 RWA 算法提供参考;并进一步研究了在 XPM 和

FWM 的同时作用下,IP 业务流量对网络性能的综合影响,通过数值计算,得到了定性定量的结果,完成了光路综合传输损伤的评估。

2 IP 业务流量对 FWM 的影响

2.1 FWM 引起的 WDM 系统中的信道间串扰

当两个或三个频率间隔比较小的光波 f_i, f_j 和 f_k 注入光纤时,由于光纤的三阶非线性电极化率的相互作用,就会产生频率为 $f_{\text{FWM}} = f_i + f_j - f_k$ 的新光频分量,所产生的新光波的光功率为^[8]

$$P_{\text{FWM}}(f_i, f_j, f_k) = \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} d^2 \chi^2 \frac{P_i P_j P_k}{A_{\text{eff}}^2} \times \exp(-\alpha L) \frac{[1 - \exp(-\alpha L)]^2}{\alpha^2} \eta, \quad (1)$$

式中 λ 为工作中心波长, c 为光速, n 为光纤有效折射率; P_i, P_j, P_k 分别代表频率为 f_i, f_j 和 f_k 的光功率; d 表示 FWM 的简并参数(当 $i = j$ 时, $d = 3$; 当 $i \neq j$ 时, $d = 6$); α 为光纤损耗系数, L 为光纤长度, A_{eff} 为光纤有效面积; χ 为三阶非线性极化率;而 η 为 FWM 效率,可表示为^[8]

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left\{ 1 + \frac{4\exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta\beta L/2)}{[1 - \exp(-\alpha L)]^2} \right\}, \quad (2)$$

式中相位匹配因子 $\Delta\beta$ 可表示为^[8]

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} |f_i - f_k| |f_j - f_k| \times \left[D + \frac{dD}{d\lambda} \left(\frac{\lambda^2}{2c} \right)^2 (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \right], \quad (3)$$

式中 D 为光纤的色散系数。(2), (3) 式体现了 FWM 效应随着信道间隔 Δf 和色散参数 D 的增加而减弱,这是由于增大信道间隔和色散参数提高了信道之间的相位失配率。

在 WDM 系统中,由于多个信道同时存在,将会存在多个信道组合满足条件 $f_{\text{FWM}} = f_i + f_j - f_k$, 此时在 f_{FWM} 处产生的 FWM 总功率为

$$P_{\text{tot}}(f_{\text{FWM}}) = \sum_{f_k = f_i + f_j - f_m} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P_{\text{FWM}}(f_i, f_j, f_k). \quad (4)$$

在接收端, FWM 噪声是和光信号一起被探测的。强度调制-直接检测(IM-DD)系统中,接收端的 FWM 噪声功率可表示为^[9]

$$N_{\text{FWM}} = 2b^2 P_s \frac{P_{\text{FWM}}}{8}, \quad (5)$$

式中 P_s 为接收端信号光的光功率, b 为光电探测器

的响应度。如果 WDM 系统中输入光功率为 P_0 ，在传输过程中， $P_s = P_0 \exp(-\alpha L)$ 。在仅考虑由 FWM 引起的噪声情况下，接收端信噪比为

$$K = \frac{bP_s}{\sqrt{N_{FWM}}} = \frac{2 \sqrt{P_0 \exp(-\alpha L)}}{\sqrt{P_{FWM}}} \quad (6)$$

假设由 FWM 引起的噪声功率服从高斯分布，那么对于 IM-DD 系统，由 FWM 引起的 BER 计算公式为

$$R_{BE} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\kappa}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (7)$$

2.2 IP 业务流量通过 FWM 对底层物理量的影响

IP over WDM 网络是一种由高性能 WDM 设备、吉比特路由交换机组成的数据通信网络，综合利用 IP 技术和基于 WDM 的光网络技术，交换机和路

由器之间可通过光纤直接相连接或连至光网络^[10]，如图 1 所示。其中 OADM 为光分插复用器，OXC 为光交叉连接器^[11]。

图中边缘节点 (edge node, 包括 IP 路由器、适配接口和 OADM) 完成 IP 包的插/分标签、标签交换、标签合并及标签入栈和出栈过程；中心节点 (center node, OXC) 提供高速交换功能，在 WDM 网络节点之间的路径就是标签交换路径 (LSP)^[12]。LSP 建立后，在数据传送过程中，中心节点不需进行显式的标记处理及查询操作，它是整个波长作为 LSP 的粒度，省略了标记合并和入栈/出栈操作，这样就提高了整个网络处理速度。在目前的光网络中一个标签就是一个波长，在未来的光网络中，一个标签可以是一个光分组、光突发包等。

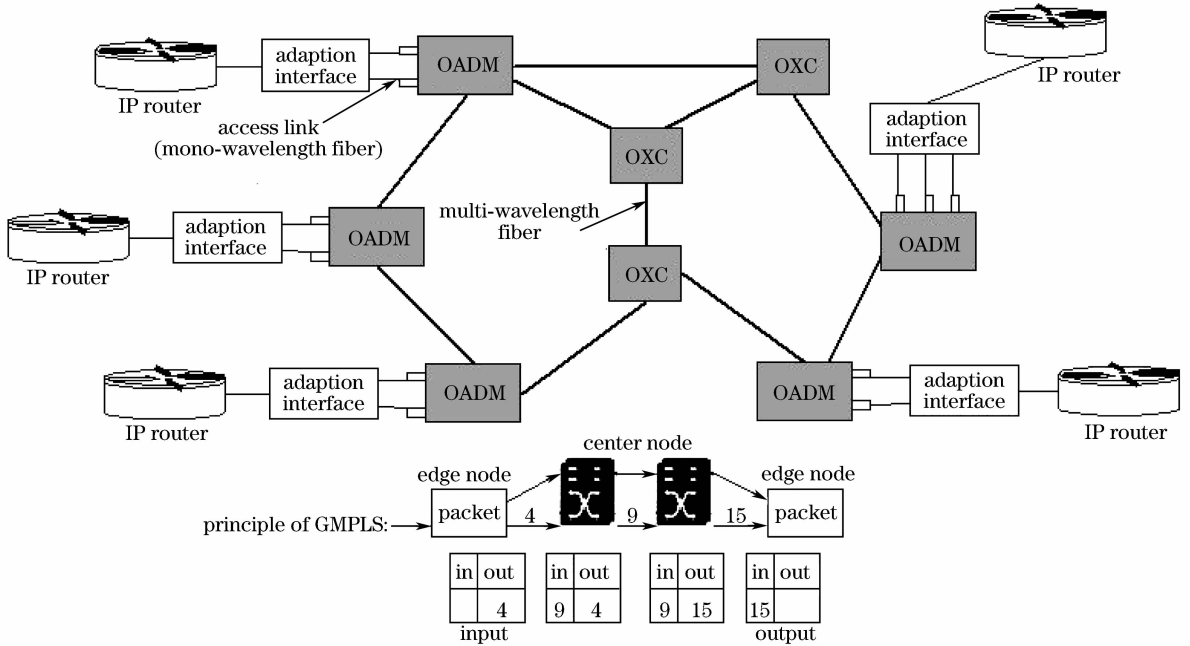


图 1 IP over 可重构 WDM 网络

Fig. 1 Architecture of IP over WDM networks

IP over WDM 网络中，精确的流量模型对高效网络拓扑结构设计、精确的网络性能分析、拥塞管理与流量均衡都有重要意义。到目前为止，ON/OFF 和泊松到达模型仍然被广泛地应用在数据流量分析，如公共电话交换网 (PSTN) 中。ON/OFF 模型表示为 $(1/\alpha, 1/\beta, R_p)$ ， $1/\alpha$ 为平均突发时间长度， $1/\beta$ 为平均静默时间长度，当数据处于 ON 状态时以峰值速率 R_p 产生流量，处于 OFF 状态时不发送数据。数据源的两种状态之间以固定概率 p_{on} 相互转换^[5]，如图 2 所示。这几个参数之间的关系为^[5]

$$p_{on} = \frac{1/\alpha}{1/\alpha + 1/\beta} = \frac{\beta}{\alpha + \beta} \quad (8)$$

这个概率也就是经常描述 IP 业务流量用到的 IP 流量负荷 (traffic load)。

目前的光网络中 IP 数据包通过同步数字体系 (SDH) 或者以太网协议成帧后再通过 GMPLS 协议映射到底层光纤上的波长上，有业务时，激光器处于“开”状态，发射光波长，否则，激光器处于“关”的

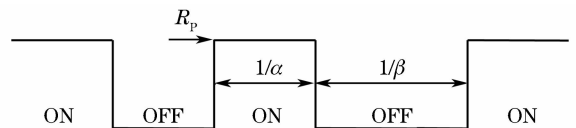


图 2 IP 业务流量的开-关模型

Fig. 2 ON-OFF IP traffic sources

状态。而动态网络中,业务呼叫到达的概率分布满足泊松分布,也就是说波长出现的概率为 p_{on} ,则 i 个波长信道同时传输光信号的概率为^[5]

$$p(i) = C_N^i p_{on}^i (1 - p_{on})^{N-i}, \quad (9)$$

式中 N 为 WDM 网络中存在的信道总数。

由于在目前光网络中 IP 数据包是直接映射到波长进行传输的,令 $\{H(T_i) | H(T_i) = 1, 2, \dots, N, i = 1, 2, 3, \dots\}$, $H(T_i)$ 为信道占用数目,表征不同时间 T_i 到达 WDM 网络边缘节点的 IP 流量的多少。任意时刻占用信道数目的概率如(9)式所示,即占用信道数目满足二项分布。当信道数目较大,如信道总数 N 达到 40, 80 或者 160 时,占用信道数目符合泊松分布,也就是说到达网络节点的 IP 流量在时间统计上满足泊松分布,记为

$$H \sim P(Np_{on}). \quad (10)$$

通过 2.1 节可知,当波长数目动态变化时,光纤中的 FWM 效应也会随之改变。因此在某特定的 IP 流量负荷 p_{on} 下,光波长 f_{FWM} 处的 FWM 功率为

$$P_{tot}^{ave} = \sum_{i=1}^N p(i) P_{ave}^i(f_{FWM}), \quad (11)$$

式中 P_{ave}^i 表示占用信道数目为 i 时,波长 f_{FWM} 处的平均 FWM 功率。

由于每条信道传输信号的概率相等,故 i 个信道的组合总数为 $s = C_N^i$,其中第 q 个组合为 $c_i^q = \{a_1^q, a_2^q, \dots, a_i^q\}$, ($1 \leq q \leq s$), 则

$$P_{ave}^i(f_{FWM}) = \frac{1}{s} \sum_{q=1}^s P_{tot,i}^q(f_{FWM}), \quad (12)$$

式中 $P_{tot,i}^q$ 表示传输信号的信道数目为 i 时,第 q 种信道组合下的 FWM 总功率

$$P_{tot,i}^q(f_{FWM}) = \sum_{k=i+j-m, k \in c_i^q} \sum_{j=a_1^q}^{a_i^q} \sum_{m=a_1^q}^{a_i^q} P_{FWM}(f_i, f_j, f_k). \quad (13)$$

2.3 数值计算结果

由(9),(11)~(13)式,可以计算出不同 IP 业务流量下的 FWM 功率;同理,结合(5)~(7)式,可以得到 BER 与流量负荷的关系。数值计算中用到的 WDM 系统参数为:信道总数 $N=40$;光比特流速率(Bit rate)为 10 Gbit/s;光纤损耗 $\alpha=0.2$ dB/km,长度 $L=80$ km,色散系数 $D=0.3$ ps/(km·nm),色散斜率 $dD/d\lambda=0.07$ ps/(km·nm²),光纤有效折射率 $n=1.46$,光学克尔系数 $n_2=2.6 \times 10^{-20}$ m²/W,光纤有效面积 $A_{eff}=50$ μ m²,工作中心波长 $\lambda=1.55$ μ m;输入光功率是可变的。

基于以上公式,得到其余所有信道通过 FWM 效应对第 20 个信道的影响,结果如图 3~6 所示。图 3 显示了当 IP 流量负荷分别为 0.3, 0.6 和 0.9 时, FWM 光功率与信道输入光功率的关系,随着输入光功率的增大, FWM 光功率也随之增大。图 4 显示了信道间隔分别为 200, 100 和 50 GHz 时, FWM 光功率随着 IP 流量负荷的增大而增大。这是因为当 IP 流量负荷增加时,传输信号的信道数目增多, FWM 效应也会严重。图 5 则显示了 IP 流量负荷分别为 0.3, 0.6 和 0.9 时 BER 与信道输入光功率的关系。

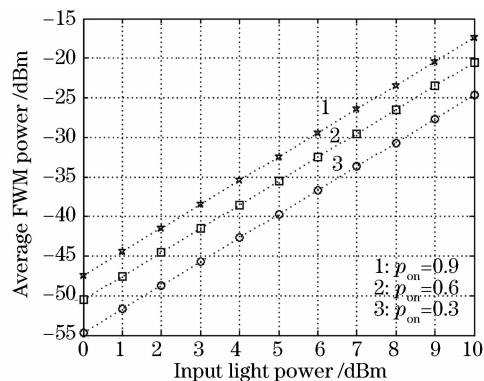


图 3 不同 IP 流量负荷下, FWM 光功率与输入光功率的关系

Fig. 3 FWM average power versus input light power

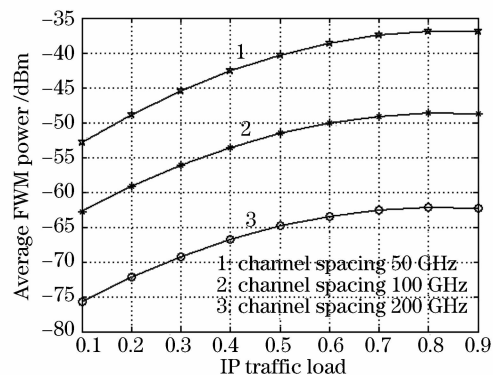


图 4 不同信道间隔下, FWM 光功率与 IP 流量负荷的关系

Fig. 4 FWM average power versus IP traffic load with different channel spacings

图 6 是假设在 WDM 网络中,传输信号的信道数目一定(39),且所有信道的光功率均为 0 dBm 时,不同的信道分布分别对探测信道——第 20 个信道 FWM 效应的影响。结果表明,第 19 信道和 21 信道对探测信道 FWM 影响最严重,其次是第 18 信道和 22 信道,第 17 信道和 23 信道。可见其他信道对探测信道的 FWM 效应影响是随着信道距离的增加

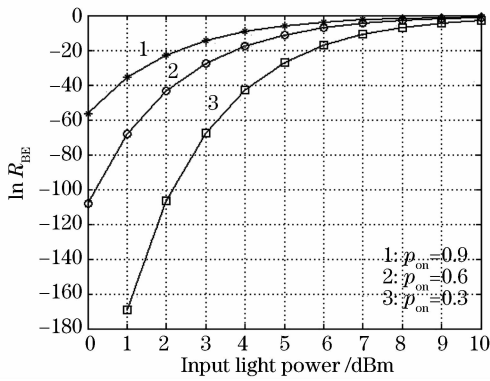


图 5 BER 与输入光功率的关系

Fig. 5 BER versus input light power

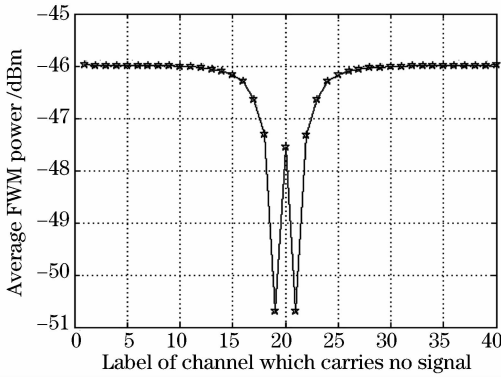


图 6 不同信道分布下的 FWM 光功率

Fig. 6 FWM power distribution for different sets of channel distribution

而呈指数递减的,这一结论能够更好地为优化 RWA 算法提供参考。

3 IP 业务流量对 FWM 效应和 XPM 效应的综合影响

3.1 WDM 动态网络中的非线性薛定谔方程

如果要综合考虑多个非线性效应对传输的影响,需要从单模光纤内一个光比特传输的非线性薛定谔方程(NLSE)入手分析^[14]

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} = i\gamma P_0 \exp(-\alpha z) |A|^2 A, \tag{14}$$

式中 P_0 为输入信号的光功率,光纤损耗通过参数 α 包括进去,参数 β_2 和 γ 分别代表群速度色散(GVD)和自相位调制(SPM)效应。

要建立适合 WDM 动态网络的数值模型,还应加入代表 XPM, FWM 和 SRS 引起的信道耦合项来加以推广,这样(14)式将会变得非常复杂,并且得到的方程组仅对于少量的信道数有用,在信道总数 N 很大时因方程组太复杂而不再适用。一个更简单的

方法是通过采用形式为^[15]

$$A(0, T) = \sum_{m=1}^N A_m(0, T) \exp[i(\omega_m - \omega_0) T] \tag{15}$$

的输入场求解(14)式。此处 $A_m(0, T)$ 代表第 m 信道的输入信号, ω 为光频率。这种方法包含了所有信道对所探测信号的 SPM, XPM 和 FWM 影响,但是忽略了 SRS。

对实际的 WDM 动态网络来讲,必须考虑每个信道的“0”和“1”比特随即序列,以此来包含比特模式效应。因此,(15)式应改写为^[15]

$$A(0, T) = \sum_{m=1}^N \left[\sum_{n=1}^k b_n U_m(T - nT_B) \right] \times \exp[i(\omega_m - \omega_0) T], \tag{16}$$

式中 U_m 为第 m 信道的脉冲波形, $T_B = 1/B$ 是比特率为 B 时的比特槽时间长度, k 代表包含在数值模型中的比特数; $b_k = 0$ 或 1 取决于第 n 个时间槽包含的是“0”还是“1”(比特)。在数值模拟中,一个随机序列至少为 32 bit, 即 $k \geq 32$ 。脉冲形状 U_m 取决于调制格式, 归零码(RZ)格式可以使用高斯或双曲正割型脉冲。

3.2 IP 业务流量对 WDM 动态网络整体性能的影响

为了研究服从泊松分布的 IP 业务流量通过 FWM 和 XPM 对底层物理传输的综合影响,假设在一段时间间隔 T 内, IP 流量负荷为 p_{on} 。首先将时间 T 离散化为 r 段

$$T = \{T_1, T_2, \dots, T_r\}, \tag{17}$$

假设 T_i 时刻, 传输信号的信道数目为 m_i , 那么序列 $\{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_r\}$ 服从泊松分布 $m_i \sim P(Np_{on})$ 。 T_i 时刻, 如果 m_i 确定, 而 IP 流量映射到每个信道的概率相等, 所以从 N 个信道中随机取 m_i 个信道 $\{a_1, a_2, \dots, a_{m_i}\}$, 则(16)式变为

$$A(0, T) = \sum_{m=1}^{m_i} \left[\sum_{n=1}^k b_n U_m(T - nT_B) \right] \times \exp[i(\omega_{a_m} - \omega_0) T], \tag{18}$$

取(18)式中的比特流的长度为 32 bit。 T_i 时刻, 比特流 $\{b_1, b_2, \dots, b_{32}\}$ 亦是随机的。

将修正后的输入项(18)式代入(14)式, 采用分步傅里叶方法对 NLSE 进行数值求解, 在接收端可得到不同 IP 流量负荷、不同光功率下的探测信道的眼图。进行数值计算所采用的参数为: $N = 40, L = 50 \text{ km}, \alpha = 0.2 \text{ dB/km}, n = 1.46, n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}, A_{\text{eff}} = 5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2, D = 16 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}), dD/d\lambda = 0.07 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}^2),$

信道间隔 $\Delta f=100$ GHz; $\lambda=1.55$ μm 。

光纤链路后接一个掺铒光纤放大器(EDFA)完全补偿光纤损耗。探测中心信道——第 20 个信道

的光脉冲传输,采用脉冲形状为高斯脉冲,在接收端可以得到不同输入光功率、不同 IP 流量下的高斯脉冲传输后的眼图,如图 7,8 所示。

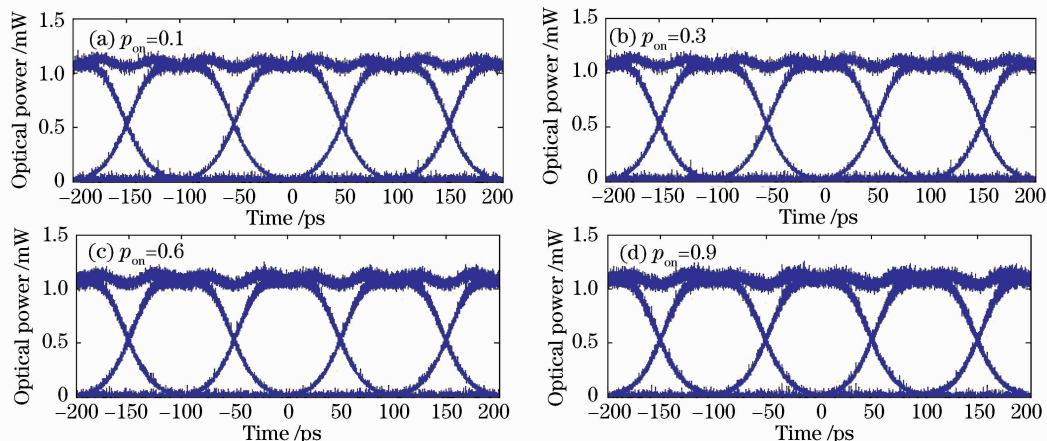


图 7 输入光功率为 0 dBm 时不同 IP 流量负荷下的眼图

Fig. 7 Eye diagrams with different traffic loads when input light power is 0 dBm

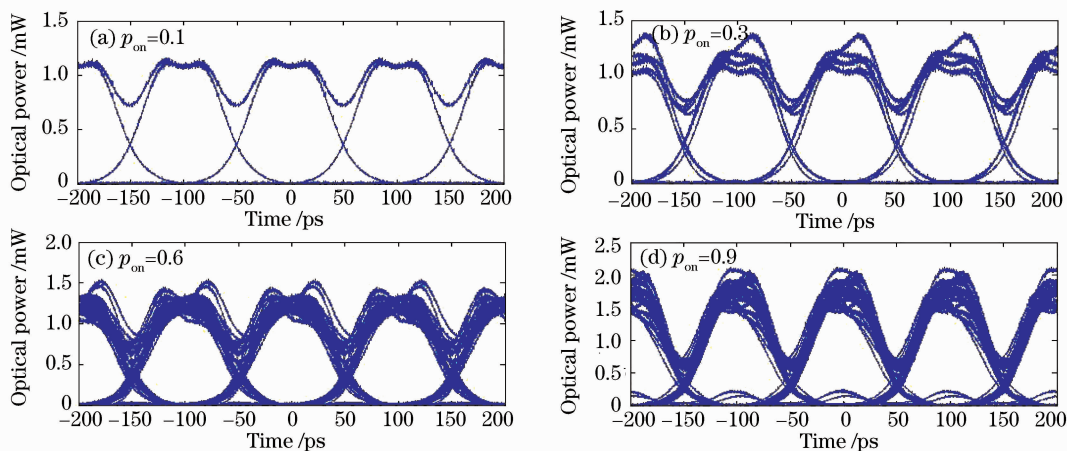


图 8 输入光功率为 5 dBm 时不同 IP 流量负荷下的眼图

Fig. 8 Eye diagrams with different traffic loads when input light power is 5 dBm

从图 7,8 得知,随着 IP 流量负荷的增加,眼图逐渐劣化;接收端的眼图闭合程度还与光功率有关。当输入光功率比较低,为 0 dBm 时,IP 流量负荷的改变对眼图的影响不是很明显;但随着光功率的增加,如光功率达到 5 dBm 时,IP 流量负荷对眼图的影响就非常明显,如图 7 所示。因此,明确 IP 流量负荷、输入光功率与 WDM 网络性能的关系,对优化 WDM 动态光网络中的路由选择算法是非常有用的。

4 结 论

研究了基于 GMPLS 协议的 IP over WDM 网络中光纤的非线性效应对 WDM 动态光网络底层物理传输的影响。随着输入光功率的增加,接收端

眼图随着泊松分布 IP 流量负荷的增加而严重劣化。在 40 信道的 WDM 系统中,当输入光功率很小时,IP 流量负荷的改变对眼图影响不明显;而当输入光功率大于 5 dBm 时,WDM 系统只有在低的 IP 流量负荷下可以正常工作,当 IP 流量负荷大于 0.6 时,眼图劣化严重,FWM 效应必须考虑。同时,通过公式计算出 FWM 功率、比特误码率与输入光功率、IP 流量负荷、信道间隔的关系。计算结果表明,FWM 功率随着输入光功率的增加而呈线性增长,与 IP 流量负荷成正比,与信道间隔成反比。明确了 IP 业务流量通过光纤非线性效应对底层物理传输的影响,对动态光网络的路由选择算法、分配 WDM 光层上端到端的光通道以及 QoS 服务模型中光交叉连接设备(OXC)的设计有重要作用。

参 考 文 献

- 1 Li Wei, Li Yuan, Huang Dexiu *et al.*. Optical link establishment method with CoS in ASON [J]. *Journal of Communications*, 2006, **27**(12):14~19
李蔚,李源,黄德修等. 具有服务等级的光链路建立方法[J]. *通信学报*, 2006, **27**(12):14~19
- 2 Li Zhaoxi, Hu Guijun, Kong Lingjie. Performance analysis of a multimode fiber communication system based on the adaptive modulation orthogonal frequency division multiplexing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):582~586
李兆玺,胡贵军,孔令杰. 自适应调制的正交频分复用多模光纤通信系统性能分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4):582~586
- 3 R. Lo Cigno, E. Salvadoril, Z. Zs'oka. Elastic traffic effects on WDM dynamic grooming algorithms [C]. *IEEE, Global Telecommunications Conference*, 2004, **3**:1963~1967
- 4 K. D. Dambul, F. M. Abbou, H. T. Chuah. Impact of SRS and XPM on the performance of IP traffic over a WDM ring network [J]. *J. Opt. Commun.*, 2007, **28**(3):198~200
- 5 Junhua Tang, Chee Kheong Siew, Liren Zhang. Optical nonlinear effects on the performance of IP traffic over GMPLS-based DWDM networks [J]. *Comput. Commun.*, 2003, **26**(12):1330~1340
- 6 Junhua Tang, Liren Zhang, Chee-Kheong Siew. The effect of IP traffic burstiness on four-wave mixing crosstalk in WDM networks [J]. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2003, **37**(3):212~214
- 7 Junhua Tang, Liren Zhang. Effect of IP traffic on optical QoS in DWDM networks [C]. *IEEE International Conference on ICON*, 2000. 370~374
- 8 M. W. Maeda, W. B. Sessa, W. I. Way *et al.*. The effect of four-wave mixing in fibers on optical frequency-division multiplexing systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(9):1402~1408
- 9 K. Inoue. A simple expression for optical FDM network scale considering fiber four-wave mixing and optical amplifier noise [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(5):856~861
- 10 Huang Shanguo, Gu Wanyi, Zhang Yongjun *et al.*. IP over WDM Networks and Application of IP over WDM Networks [M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2008. 304~309
黄善国,顾婉仪,张永军等. IP 数据光网络技术与应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2008. 304~309
- 11 Han Qingsheng, Li Wei, Mei Junyao *et al.*. Accurate computation of the bit rate error in differential phase-shift keying-balanced direct detection receiver of high speed optical communication systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11):2977~2983
韩庆生,李蔚,梅君瑶等. 光纤通信系统中 DPS 平衡接收机系统误码率的精确计算[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11):2977~2983
- 12 Zheng Yanlei, Gu Wanyi, Huang Shanguo *et al.*. GMPLS-based fast restoration mechanism for meshed networks in ASON [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2):227~232
郑滢雷,顾婉仪,黄善国等. 一种基于 GMPLS 协议快速实现 ASON 网络恢复的策略[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2):227~232
- 13 Shi Haibin, Zhu Guangxi, Zhu Peng *et al.*. Enhanced ON/OFF dynamic traffic model and its simulation [J]. *Computer Science*, 2009, **36**(2):75~77
史海滨,朱光喜,祝鹏等. 一种增强的 ON/OFF 瞬时流量模型及其仿真[J]. *计算机科学*, 2009, **36**(2):75~77
- 14 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Application of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Third Edition, Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.* transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 491~492
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 第三版,贾东方,余震虹,谈斌等译. 北京:电子工业出版社, 2002. 491~492
- 15 Zhang Huan, Li Wei, Mei Junyao *et al.*. Transmission penalty of dynamical optical networks considering accumulation effects of XPM and ASE noises [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5):1111~1117
张欢,李蔚,梅君瑶等. 动态光网络中交叉相位调制和放大自发辐射噪声积累效应的传输代价[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5):1111~1117