

基于物理损伤联合影响的光信号脉宽模型研究

赵继军^{1,2}, 郭昆^{1,2}, 李志华^{1,2}, 王丽荣³, 赵文玉⁴

(1. 河北工程大学 信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 邯郸市光纤通信与宽带接入技术重点实验室, 河北 邯郸 056038;
3. 邯郸职业技术学院 实验实训中心, 河北 邯郸 056001; 4. 工业和信息化部 电信传输研究所, 北京 100045)

摘要: 针对物理损伤的精确评估问题, 分析了自相位调制(SPM)对群速度色散(GVD)的抑制或加强作用。基于它们共同对信号产生的影响, 提出了考虑物理损伤联合影响的光信号脉宽模型, 并将此模型应用到基于物理损伤感知的路由波长分配(IA-RWA)算法仿真中。仿真结果表明, 综合考虑物理损伤的联合影响有利于准确规避损伤严重的路径, 降低阻塞率。

关键词: 光网络; 损伤感知; 路由波长分配; 群速度色散; 自相位调制

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)11-0008-09

Research on pulse width model of optical signal based on effects of combined physical impairments

ZHAO Ji-jun^{1,2}, GUO Kun^{1,2}, LI Zhi-hua^{1,2}, WANG Li-rong³, ZHAO Wen-yu⁴

(1. School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Handan Key Laboratory of Optical Fiber Communication & Broadband Access Technologies, Handan 056038, China;

3. Experimental Training Center, Handan Polytechnic College, Handan 056001, China;

4. Research Institute of Telecommunication & Transmission, MIT, Beijing 100045, China)

Abstract: For the accurate assessment of physical impairments, the suppression or enhancement effect of self phase modulation (SPM) on group velocity dispersion (GVD) were analyzed. Then, a pulse width model based on their combined effects on signal distortion was proposed. This model considered the effects of combined physical impairments, and it was applied in the simulation of the impairment-aware routing and wavelength assignment (IA-RWA) algorithm. The results indicate that comprehensive consideration of the effects caused by combined physical impairments is conducive to accurately avoid more serious physical impairments during routing and reduces blocking rate.

Key words: optical network; impairment-aware; routing and wavelength assignment; GVD; SPM

1 引言

光网络向高速、动态、全光透明架构的演进使得光层物理损伤对光路传输质量的不利影响

越来越突出, 一条已建立的光路径 (light path) 往往会由于严重的物理损伤所导致的高误码率而使得传输的信息不能正确到达, 因此, 基于物理损伤感知的路由波长分配(IA-RWA)问题引

收稿日期: 2011-11-02; 修回日期: 2012-05-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61171076); 河北省自然科学基金资助项目 (F2010001045); 河北省教育厅科学研究计划资助项目 (2008110); 河北省科学技术研究与发展计划资助项目 (10213545)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61171076); The Natural Science Foundation of Hebei Province (F2010001045); The Scientific Research Fund of Hebei Province Education Department (2008110); The Scientific Technology Research and Development Program of Hebei Province (10213545)

起了广泛的关注^[1~4]。IA-RWA 问题的解决要适应光网络发展面向业务的特征，要充分考虑到业务特性和传输质量需求，力求为用户提供有保证的传输服务，而透明光网络中光层物理损伤所具有的多样性、复杂性等特征给问题的解决带来了巨大挑战^[5~9]。

因此，信息在传输过程中如何通过基于光层物理损伤感知的 RWA 算法自适应地规避物理损伤的影响为业务提供满足其传输质量需求的传输服务是亟待解决的问题，而对于 IA-RWA 算法的研究，最重要的是对光路上的损伤进行详细准确地评估，然后选择损伤较小的光路进行传输，达到信息低损耗传输的目的。对损伤的评估即是通过建立光层物理损伤模型来估算物理损伤对传输质量的影响，常用模型有光信噪比(OSNR)模型^[10,11]、Q-factor(Q 值)模型^[12,13]等。

文献[10]考虑了链路中每个跨段的放大器自发辐射噪声(ASE)，并折合为 OSNR 的减少作为信号质量评估的一个参数，另外考虑色散(CD)和偏振模色散(PMD)的程度分别作为信号质量的其他 2 个参数，以 3 个参数为损伤感知选路的标准。文献[11]在考虑 ASE 噪声的同时，将放大器对信号的增益以及噪声的放大情况引入到损伤模型的构建中，同时考虑了波长相关的物理损伤，如串扰(XT)和四波混频(FWM)，将它们计算为 OSNR 的变化进行信号质量的评估，另外考虑 PMD 为单独的信号影响参数。文献[12]对光信号传输的物理层损伤作了较为全面的分析，文中采用的是 Q 值模型，涉及到在信道内有较大影响的 ASE 噪声、PMD、CD、SPM 等以及对外信道影响较大的 XT、交叉相位调制(XPM)和 FWM，通过计算它们对信号 Q 值的影响来判断信号质量。文献[13]在评估信号质量时使用的是与文献[12]类似的 Q 值模型，但文中指出了信号评估模型的不精确会导致选路错误，针对这个问题提出了降低选路错误率的新型选路算法。

以上文献中所提到的损伤评估模型通常都是将多种物理损伤进行综合构建成为一种或几种指标共同用于损伤的估计，这样做可以统一性能优劣的标准，有利于进行网络监控^[14,15]，且具有较好的网络移植灵活性和模型拓展性，然而光层物理损伤复杂多样，每种损伤对信号产生的影响又各不相同，它们之间也存在着一定的相互作用，且对损伤的准确评估有不可忽视的影响，但上述文献中均缺

少此类研究，所以损伤评估模型需要更加细化。光层物理损伤中的群速度色散(GVD)和自相位调制(SPM)在信号传输中各自作用于光脉冲的同时，它们之间的相互作用使这 2 种物理损伤共同影响着光信号脉冲宽度的改变^[16]。光信号脉冲的展宽会造成相邻码元间的串扰，对信号接收端的判决产生干扰，且大大降低信号的传输速率，造成高速传输的不可达，针对这个问题，本文将 GVD 和 SPM 分离出来进行详细的研究分析，把这 2 种损伤综合起来考虑并加入到损伤评估模型的构建中，建立信号脉宽模型，使评估模型更加具体，在使用损伤感知的路由算法进行光路选择时，结果也会更加准确。

2 GVD 与 SPM 的联合影响分析

2.1 分离的物理损伤影响

文献[16]指出，对于 GVD，当光脉冲进入光纤进行传输后，会形成啁啾脉冲，引起中心频率为 ω_0 的脉冲从中心到两侧存在频率差，这个差值为

$$d\omega_1(T) = \frac{2 \operatorname{sgn}(b_2) |b_2| Tz}{T_0^2 + |b_2|^2 z^2} \quad (1)$$

这种差值是 GVD 引起的频率啁啾，其中， β_2 是光纤的群速度色散参数， T_0 是初始脉冲宽度，式(1)表明啁啾有正负之分，取决于 β_2 的符号，当 $\beta_2 > 0$ (正常色散区域)，脉冲前沿的啁啾 $d\omega$ 为负，向后沿 $d\omega$ 线性增大；而当 $\beta_2 < 0$ (反常色散区域)，情况相反。其中，时域脉冲宽度变化为

$$T_z(z) = T_0 [1 + (z/L_D)]^{1/2} \quad (2)$$

其中， L_D 为色散长度。

而对于 SPM，它所引起的频率啁啾为

$$d\omega_2(T) = \frac{2L_{\text{eff}} g P_0 T}{T_0^2} \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right) \quad (3)$$

其中， g 为非线性效应参数， L_{eff} 为有效长度， P_0 是脉冲的峰值功率，由式(3)可知，这种频率啁啾随着光脉冲传输距离的增大而增大，由于新的频率分量在传输过程中不断增加，造成光脉冲的频谱展宽。在实际系统仿真测量中，随着光脉冲在光纤中传输距离的增大，脉冲的频谱宽度会逐渐增大，甚至会出现了畸形的频谱，但是仅存在的 SPM 几乎对时域脉冲宽度不产生影响。

2.2 损伤联合影响的系统仿真分析

如前所述，GVD 会造成时域脉冲展宽，对频谱

无影响；SPM 造成的是脉冲频谱的展宽，对时域脉冲的宽度并无影响。为了研究当光信号脉冲在光纤中传输时，同时存在的 GVD 和 SPM 对信号的时域脉冲宽度的影响，建立如图 1 所示的仿真系统进行仿真，仿真采用的是 Optisystem 光纤系统仿真软件，仿真参数如表 1 所示。

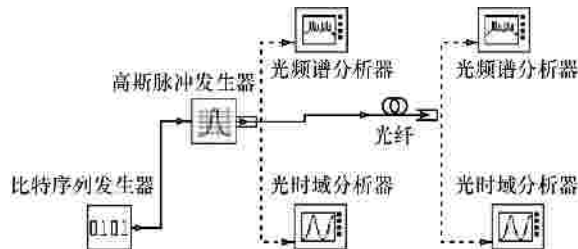


图 1 GVD 与 SPM 联合影响光信号检测系统

表 1 系统仿真主要参数

名称	数值
峰值功率	1W
波长窗口	1 550nm
比特速率	40Gbit/s
脉冲初始宽度	7.5ps
光纤长度	10km
非线性系数 γ	1.317W ⁻¹ /km
光纤衰减	可忽略
SPM	可用
GVD	可用
群速度色散参数 β_2	-20ps ² /km

系统首先由比特序列产生器开始，设定所要发射的比特序列，然后经光信号高斯脉冲产生器产生相应的高斯脉冲信号进入光纤进行传输，在发射端和接收端分别设置一个光时域脉冲示波器和光频域示波器，用来观测时域脉冲和频谱的变化。

检测单一码元脉冲的变化时，系统使用比特序列“000000100000000”，经过仿真可知，当光脉冲沿光纤传输 10km 时，GVD 对时域脉冲宽度的影响和加入 SPM 后对脉冲宽度的影响的对比结果如图 2 所示。

仿真包括 2 种情况：一是单独 GVD 对光信号时域脉冲宽度的影响，二是加入 SPM 后，2 种损伤对脉冲宽度的影响。如前分析，由于 SPM 单独影响光脉冲的时候，并没有改变时域脉冲的宽度，但是从图 2 的脉冲宽度对比中可以看出，当 SPM 与 GVD 共同对光脉冲产生影响时，光脉冲的宽度比单独 GVD 影响时的脉冲宽度要窄，这说明，SPM 的

加入抑制了脉冲的展宽。

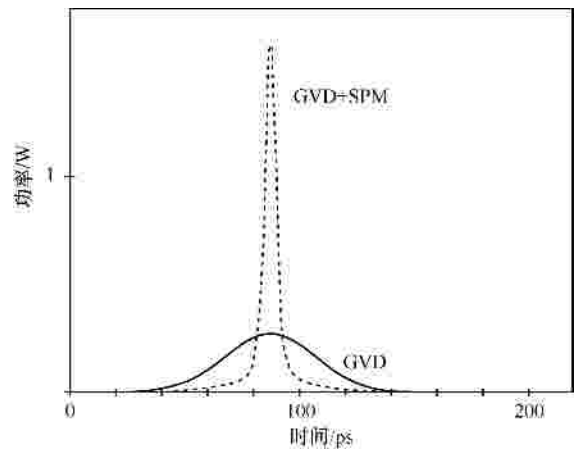


图 2 不同损伤下的单码元脉冲变化

检测连续码元相互间的干扰时，令发射端发射比特序列“000000110000000”，则初始码元脉冲如图 3 所示，经过系统仿真后结果如图 4 所示。

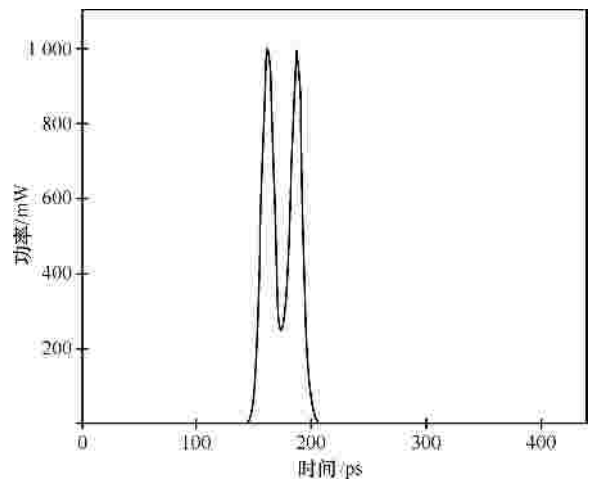


图 3 连续码元脉冲

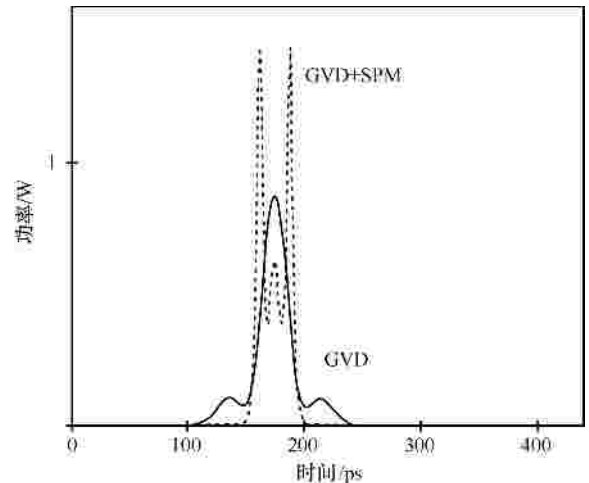


图 4 不同损伤下相邻码元脉冲的干扰对比

从图 3 和图 4 中可以看出，当只有 GVD 时，相邻的“1”码元串扰严重，已无法判决，但是加入 SPM 后，由于 SPM 对 GVD 脉冲展宽的抑制，依然可以在接收端判决出正确的码型。

以上仿真是在反常色散的情况下进行的，即群速度色散参数 $\beta_2 < 0$ ，在实际应用中，并不是所有光纤的 β_2 值都是一样的，它是随着光纤材料、传输所用波长的变化而变化的。表 2 说明了几种不同类型的光纤在同一波长下时的群速度色散参数 β_2 值。

光纤类型	波长窗口为 1 550nm 的光纤 β_2 值/(ps ² /km)
标准单模光纤 ITU-G.652	- 21.68
零色散位移光纤 ITU-G.653	0
截止位移波长光纤 ITU-G.654	- 25.50 ~ - 21.68
非零色散位移光纤 ITU-G.655	- 10.20 ~ - 3.316
宽带传输非零色散位移光纤 ITU-G.656	- 19.13 ~ - 2.550

除了表 2 中所示的标准光纤类型，常用的还包括负色散光纤，其 β_2 值范围为 3.826~10.20ps²/km。为了说明当群速度色散参数 $\beta_2 > 0$ 与 $\beta_2 < 0$ 时，GVD 和 SPM 共同对时域脉冲宽度的影响有什么不同，令表 1 中的仿真参数 β_2 在绝对值不变的情况下符号取反，用相同的系统进行仿真，比特序列为单“1”码元，结果如图 5 所示。

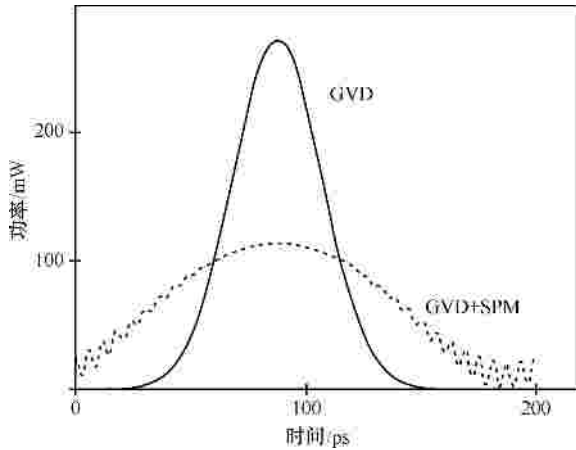


图 5 $\beta_2 > 0$ 时不同损伤下的单码元脉冲变化

将图 5 结果和图 2 进行对比可知，当光信号脉冲属于正常色散区域，即 $\beta_2 > 0$ 时，在 GVD 的仿真中加入 SPM 会加剧色散的程度，光脉冲的时域脉宽展宽也随之加大，并在脉冲的边沿出现锯齿形振荡。

当发射含有连续“1”码元的比特序列时，结果如图 6 所示。

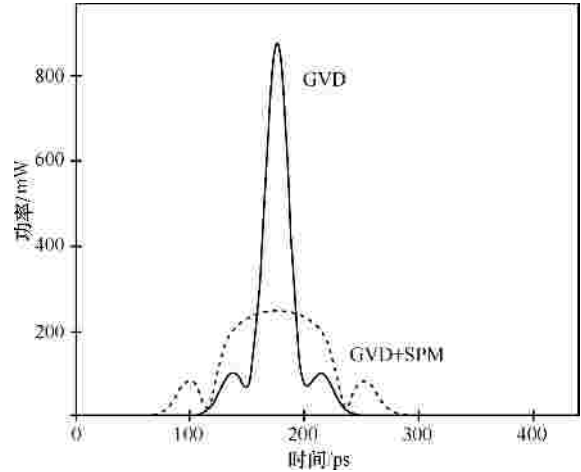


图 6 $\beta_2 > 0$ 时不同损伤下相邻码元脉冲的干扰对比

从图 6 可知，当光脉冲处于正常色散时，SPM 加剧了码元脉冲间的串扰。

2.3 建立光信号脉宽模型

据上分析，由式(3)可知，SPM 所引起的啁啾在中心频率附近是正的，所以由式(1)和式(3)可知，当 $\beta_2 > 0$ 时，GVD 和 SPM 共同引起的正的啁啾，加速了脉冲的展宽；当 $\beta_2 < 0$ 时，GVD 引起的啁啾是负的，它和 SPM 引起的正啁啾进行了抵消，降低了脉冲的展宽速度。这种现象和对高斯脉冲信号进行预啁啾^[16]较为类似，因此可以根据预啁啾脉冲展宽公式推测出 SPM 引起的啁啾脉宽变化模型，进而预测脉冲的展宽程度，设啁啾参量为 C ，则由式(3)可得 C 的平均值为

$$C = dw_2(T)/2 = \frac{L_{\text{eff}} g P_0 T}{T_0^2} \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right) \quad (4)$$

令 $T=T_0$ 时，SPM 产生的啁啾为最大值，令光纤吸收损耗为 0，则取 $L_{\text{eff}}=z$ ，那么，根据预啁啾公式可以推导出 SPM 所引起的脉宽模型为

$$T_C = \left[\left(1 + \frac{\text{sgn}(b_2) |b_2| g P_0 z^2}{e T_0^3} \right)^2 + \left(\frac{b_2 z}{T_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} T_0 \quad (5)$$

当 $\beta_2 < 0$ 时，由式(5)可得出最小脉冲宽度模型可以近似为

$$T_{\text{min}} = \frac{T_0}{\left[1 + \left(\frac{L_{\text{eff}} g P_0}{T_0 e} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (6)$$

但是,SPM 引起的啁啾所造成的脉冲窄化和预啁啾并不完全一样,预啁啾只发生在发射端,而 SPM 引起的啁啾发生在从始至终的脉冲传输过程中,预啁啾只能引起暂时的窄化,当传输一段距离后,脉冲会重新展宽,甚至超过初始脉宽,而由于 SPM 所引起的啁啾在脉冲传输中一直存在,所以脉宽会持续窄化,直到 SPM 啁啾和 GVD 所引起的啁啾基本上完全抵消,既不会使脉宽窄化,也不会展宽,脉宽会保持恒定,这也和实际的系统仿真测量值近似相符;当 $\beta_2 > 0$ 时,信号脉宽是一直增大的,则脉宽模型即为式(5)。

3 基于损伤联合影响的网络仿真

3.1 考虑损伤联合影响的重要性

如前分析,由于在不同类型的光纤中 GVD 和 SPM 对光脉冲的联合影响所产生的脉冲展宽的程度可能比 GVD 单独影响时严重,也可能减轻,因此,在进行基于物理损伤的路由选择时,需要判断多损伤共同对信号产生的影响是相长还是相消,这对准确计算光网络路径中的物理损伤很重要。

为了验证物理损伤联合作用对光脉冲的不同影响考虑到损伤评估模型中的重要性,本文作了如下网络拓扑选路模拟仿真。如图 7 所示网络拓扑结构,共有 4 个节点。假设在此网络中存在 2 种物理损伤 A 和 B,它们对每条链路的影响值由表 3 给出。

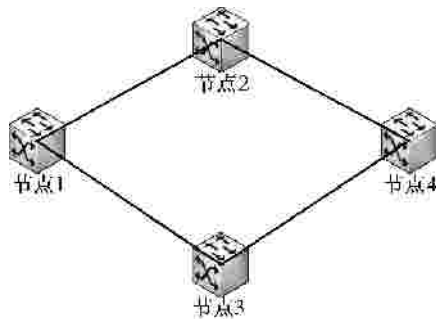


图 7 4 节点网络拓扑

表 3 损伤 A 和 B 对链路影响值

链路	A 的影响值	B 的影响值
1 2	5	3
2 4	5	4
1 3	2	6
3 4	3	5

在对 4 节点网络拓扑进行基于物理损伤的路由

选择研究时,光信号脉冲将选择损伤最小的那一条路径进行传输。假设发射端为节点 1,接收端为节点 2,当只考虑损伤 A 时,路径 1 2 4 的累积损伤为 10,路径 1 3 4 的累积损伤为 5,则选择路径为 1 3 4;当只考虑损伤 B 时候,1 2 4 的累积损伤为 7,路径 1 3 4 的累积损伤为 11,则选择路径为 1 2 4;当 2 种损伤都考虑时候,且 2 种损伤的共同作用是损伤相长的,则路径 1 2 4 的累积损伤为 17,路径 1 3 4 的累积损伤为 16,则选择路径为 1 3 4;当 2 种损伤都考虑时候,且 2 种损伤的共同作用是相消的,则 1 2 4 的累积损伤为 3,1 3 4 的累积损伤为 6,则选择的路径为 1 2 4。

从上述分析中可知,在进行损伤感知的路由选择时,计算需考虑的物理损伤不同,多物理损伤联合影响的不同(损伤相长或相消)会使所选择的路径完全不同,所以,准确地考虑物理损伤的联合影响,对于准确地选择损伤最小路径有很大的重要性。

3.2 网络仿真算法流程

通过前面的论述可知,在网络中选择路径时,准确地掌握链路状态,对于保证信号有质量地传输是很有必要的。因此,本文在选路的时候计算出损伤影响最小的路径来传输光信号,也就是使用最小损伤路径选择算法来进行网络拓扑中路径的选择,即选择信号脉冲展宽最小的路径,算法流程如图 8 所示,主要包括 2 部分,一是网络路由信息初始化,就是收集网络拓扑中各节点间的路由损伤信息,在本文中就是脉冲展宽程度信息,并把这些信息加入到路由表中;二是选则最小损伤路径,为保证信号的有质量传输,根据网络初始化所建立的路由表,连接请求从中选择脉冲展宽程度最小的一条路径进行光信号的传输,在目的节点会判定是否是可接受的脉宽,从而决定连接请求是否能够成功建立。其中,最重要的部分就是网络路由表的建立,路由表中记录网络中各个链路的状态,为网络中的连接请求提供了选择路径的依据,由于链路的状态信息有可能变化,所以每隔一段时间就需要更新路由表,以掌握网络链路的最新状态,有利于更好地进行选路。路由表的建立算法如图 9 所示。

4 仿真结果与分析

仿真采用 C++ 环境编写的仿真软件,通过设置逻

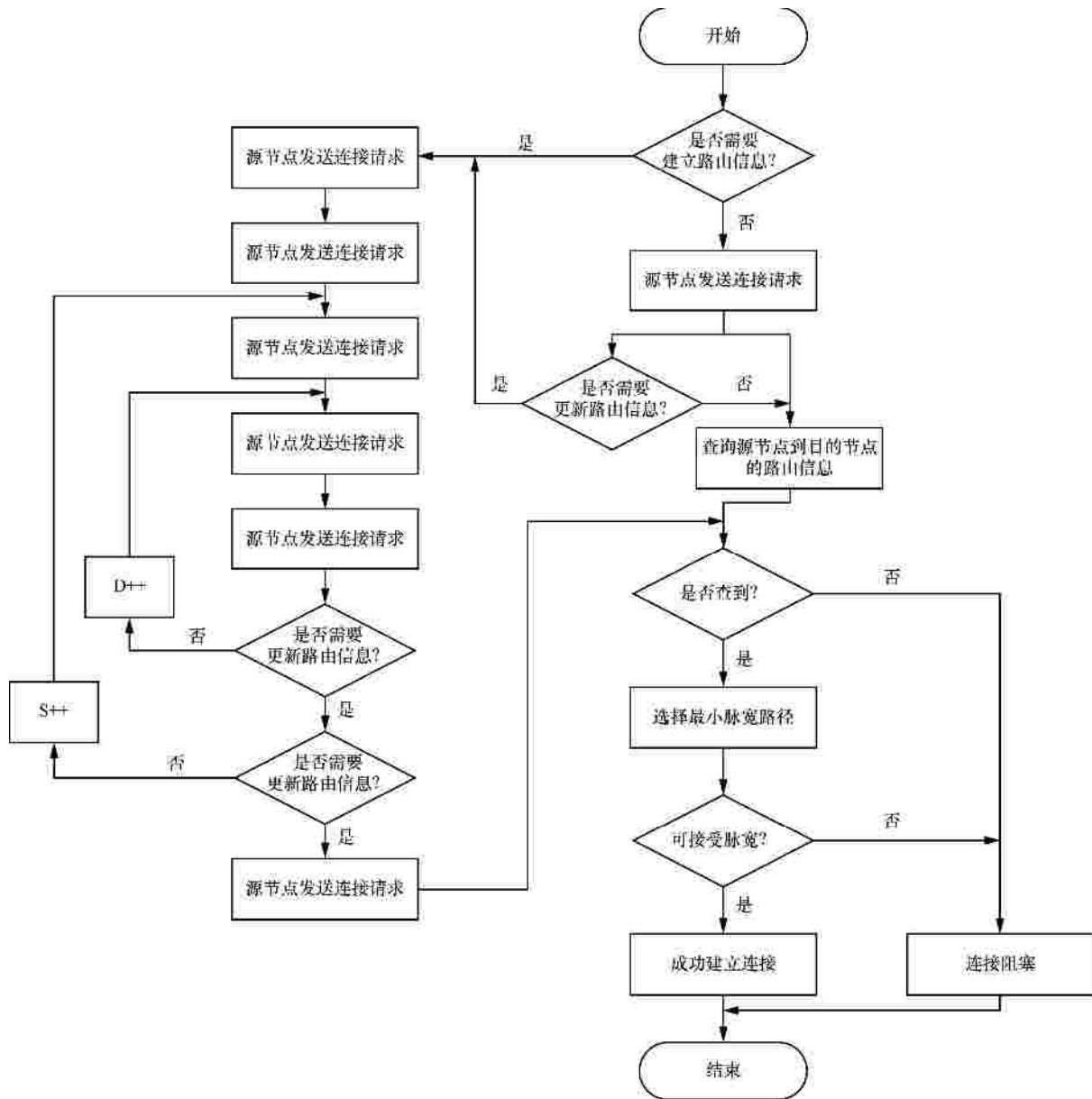


图 8 基于损伤联合影响的最小脉宽选路算法流程

辑拓扑及相应的仿真环境来达到仿真的效果。本文采用图 10 所示的 NSFNET 网络拓扑对 GVD 和 SPM 对光传输的共同作用进行了网络仿真,拓扑中的链路长度均按一定比例进行了缩小。具体数值如图 10 所示。网络节点无波长转换能力,连接请求将均匀地分布在各节点对之间,到达网络时间服从泊松分布,仿真在无任何损伤补偿的情况下进行。在链路中选取 5 条链路的光纤,令其 $\beta_2 = -5\text{ps}^2/\text{km}$, 分别是链路 1, 2, 5, 7, 9, 12, 11, 13, 13, 14, 对于网路拓扑中其余链路的光纤,取 $\beta_2 = 5\text{ps}^2/\text{km}$, 在仿真中使用较高的脉冲峰值功率,这样可以更好地观察群速度色散参数 β_2 的正负对光传输的影响,仿真具体参数如表 4 所示。

```

1) for (源节点 i=0; i<网络节点总数; i++)
2)   for (目的节点 j=0; j<网络节点总数; j++)
3)     {
4)       if (源节点号不等于目的节点号)
5)         {
6)           记录所有可能的路径;
7)           计算所有路径的信号脉宽变化;
8)           将信号脉宽最小的那条路径记录到路由表中;
9)         }
10)      else
11)        记录初始信号脉宽到路由表中;
12)    }

```

图 9 最小损伤影响路由表建立算法

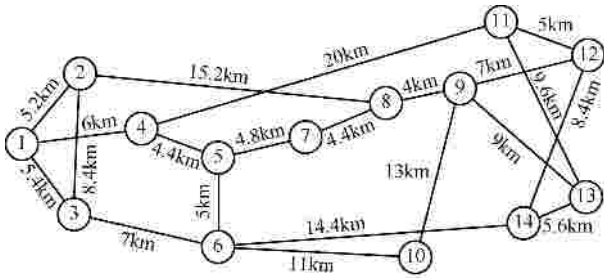


图 10 NSFNET 网络拓扑

表 4 网络仿真参数

名称	数值
峰值功率	1W
波长窗口	1 550nm
比特速率	40Gbit/s
脉冲初始宽度	7.5ps
非线性系数 γ	1.317W ⁻¹ /km
光纤衰减	可忽略
群速度色散参数 β_2	5 或 -5ps ² /km
最大脉冲展宽 ^[11]	10%

在算法仿真中，连接请求所使用的波长均在 1 550nm 波长窗口里，为了研究损伤对网络阻塞率的影响，假设波长资源在仿真过程中不会缺乏，则随着网络负载的增多，连接请求不会因为波长资源的限制而阻塞。对 NSFNET 拓扑的仿真过程分为 2 个部分：一是使用最小损伤路径算法和最短路径算法进行连接请求的选路，对这 2 种算法所选路径的连接请求阻塞率比较，仿真结果如图 11 所示；二是损伤计算时单独考虑 GVD 和同时考虑 GVD、SPM 都使用最小损伤路径算法进行选路，对这 2 种情况下的连接请求阻塞率进行比较，其中，单独考虑 GVD 时，脉宽模型如式(2)所示，综合考虑 2 种损伤的联合影响时，脉宽模型如式(5)所示，仿真结果如图 13 所示。

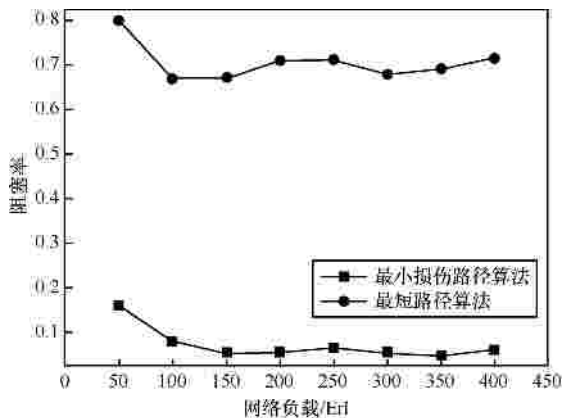


图 11 2 种不同算法的阻塞率比较

从图 11 中可以看出，使用最小损伤算法在网络中选路的阻塞率明显低于使用最短路径算法，说明在一个任意的拓扑中进行选路时，虽然最短路径算法可以选择源节点到目的节点最短的距离传输，但是链路上各种损伤的不确定性造成了最短的链路距离里有可能存在较大的物理损伤。在本文仿真所用的 NSFNET 网络拓扑中存在着不同类型的光纤，当光纤的群速度色散参数 $\beta_2 < 0$ 时，GVD 和 SPM 的相互作用会抑制光脉冲的展宽，而 $\beta_2 > 0$ 时，它们之间的相互作用会加速光脉冲的展宽，使用最短路径算法选路不会考虑链路的光纤类型，即不考虑光脉冲的展宽程度，也就不会选择脉冲展宽最小的路径传输，这样造成了光信号脉冲的急剧展宽而不加规避，使信号不可用，因此最短的传输距离并不意味着最佳的信号传输质量。当使用最小损伤算法进行路由的选择时，连接请求总是沿着损伤最小的路径进行传输，所以与选择最短路径进行传输相比，前者的信号在到达目的节点时，可接受的几率较大，网络的阻塞率较低。

本文对 2 种不同的算法在选路中所消耗的时间进行了统计，结果如图 12 所示。

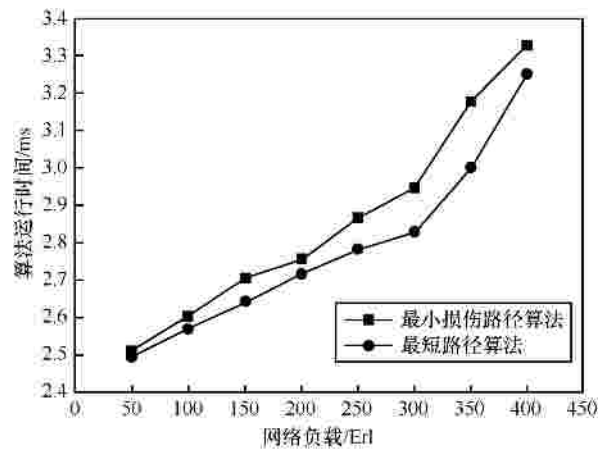


图 12 算法运行时间比较

从图 12 中可以看出，随着网络负载的增加，选路时的算法运行时间也在逐渐增加，这是因为算法处理增加的连接请求数需要消耗更多的时间。最小损伤路径算法比最短路径算法的运行时间平均要长 2.5%，这是因为前者在选路过程中，需要收集节点间链路的长度信息和损伤信息，并加入路由表进行选路，这增加了算法的计算时间，而后者只考虑了节点间的路径长度信息，算法复杂度要低于前者，算法运行时间自然要低。这说明要获得网络拓扑中各个路径的详细信

息是要以牺牲算法时间为代价的，只要算法时间在可接受的范围内，为了掌握更详细的路径损伤信息，还是应该选择最小损伤路径算法。

从图 13 中可以看出，在使用最小损伤路径算法进行选路时，单独考虑 GVD 的影响比同时考虑 GVD、SPM 2 种损伤影响的网络阻塞率明显要高，这是因为在光脉冲在网络拓扑中传输时同时存在着正常色散和反常色散，在反常色散中 SPM 可以抑制 GVD 的色散脉冲展宽，而单独考虑 GVD 时忽略了这种抑制作用，这对链路物理损伤的计算结果有很大影响。仿真说明了在进行损伤感知的路由算法时，考虑各个损伤对信号的共同影响对准确选择损伤最小路径很重要，在损伤的计算模块中，如果不能全面地考虑各个损伤影响的共同结果，就不能得到正确的损伤评估模型，从而造成错误的选路结果，增加连接请求的阻塞率。

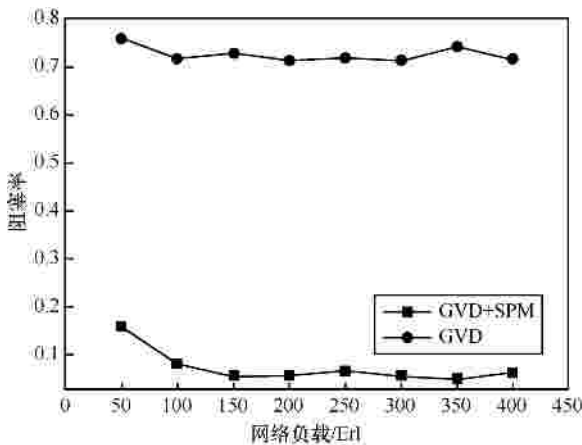


图 13 考虑不同损伤的阻塞率比较

由式(4)可知 SPM 对光信号脉冲的频率啁啾影响是和峰值功率的大小成线性关系的，为了研究峰值功率的变化是否影响网络拓扑中信号选路的阻塞率，本文在上述算法仿真的基础上进行修改^[11]，峰值功率 P_0 的设定值如表 5 所示。

表 5 仿真功率参考

仿真次数	P_0/w
1	0.1
2	0.3
3	0.5
4	0.7
5	1

经过 NSFNET 拓扑的仿真，结果如图 14 所示。

从图 14 中可以看出，随着脉冲峰值功率的升高，在相同负载下的网络信息阻塞率是逐渐下降的，这是因为在较低的峰值功率下，SPM 引起的频率啁啾影响较小，当光信号脉冲在处于反常色散区域的光纤中传输时，SPM 对 GVD 脉冲展宽的抑制作用就弱，从而造成信号脉冲到达目的节点时的脉宽较大，超过可接受脉宽的几率也就加大，即阻塞率增大。当峰值功率升高时，SPM 引起的频率啁啾加大，SPM 对 GVD 的脉冲展宽的抑制作用也就随之增强，信号脉冲到达目的节点时的脉宽可接受几率提高，即网络信息的阻塞率下降。另外，图中还显示当网络负载较小(50~150Erl)时阻塞率较大，并且随着网络负载的增加，阻塞率下降并趋于稳定。这是由于网络链路的参数不同以及连接请求出现位置的不确定性，某些节点的连接请求经过损伤感知的选路后依然不可正确到达目的节点，造成了在总连接请求数较少时的较大阻塞率，这表明所选链路中需配置再生器；而随着网络负载的增多，连接请求遍布整个网络，根据最小损伤的选路算法，大部分连接请求在选路中避免了损伤严重的路径，保证了较小且稳定的网络阻塞率。

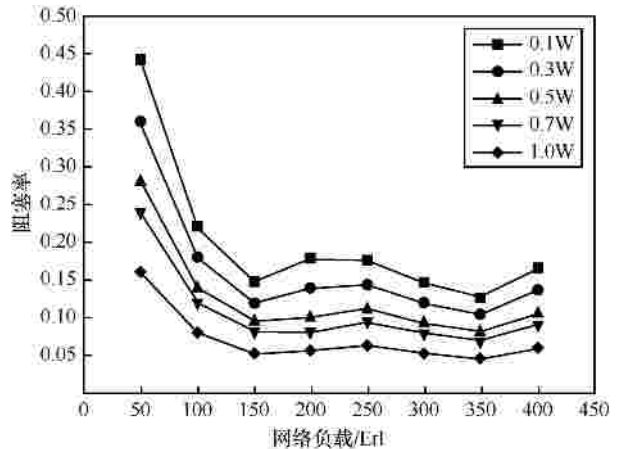


图 14 不同峰值功率下的阻塞率

5 结束语

本文通过研究 GVD 和 SPM 共同对光信号脉冲产生的影响，展示了在光信号传输中，SPM 在一定程度上对 GVD 的脉冲展宽有抑制和增强 2 种不同的作用，在此基础上，创新性地构建了一种考虑物理损伤联合影响的光信号脉宽损伤模型，并将模型应用到基于损伤感知的网络拓扑选路当中。通过仿真实

验和分析, 脉宽损伤模型可以正确地反应当前链路中的脉冲展宽程度, 有效地提高了最小损伤路径算法在选路中的可用度, 其优势明显高于最短路径算法。

参考文献:

- [1] BERTHOLD J, SALEH A A M, BLAIR L, *et al.* Optical networking: past, present and future[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(9):1104-1118.
- [2] AZODOLMOLKY S, KLINKOWSKI M, MARIN E, *et al.* A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks[J]. *Computer Networks*, 2009, 53(7):926-944.
- [3] LIN W, HAHN T, WOLFF R S, *et al.* A distributed impairment aware QoS framework for all-optical networks[J]. *Optical Switching and Networking*, 2011, 8(1):56-67.
- [4] CHRISTODOULOPOULOS K, KOKKINOS P, MANOUSAKIS K, *et al.* Impairment aware RWA in optical networks: over-provisioning or cross optimization[J]. *Journal of Networks*, 2010, 5(11):1271-1278.
- [5] LIU Y J, GU W Y, ZHANG J, *et al.* A study of self-adaptive transmission control architectures in impairment-aware transparent WDM networks[A]. *Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering*[C]. Hangzhou, China, 2008. 1-8.
- [6] *Physical Transfer Functions of Optical Network Elements*[S]. 2007.
- [7] TOMKOS I, VOGIATZIS D, MAS C, *et al.* Performance engineering of metropolitan area optical networks through impairment constraint routing[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(8):40-47.
- [8] LEE Y. Information model for impaired optical path validation[EB/OL]. <http://tools.ietf.org/pdf/draft-bernstein-wson-impairment-info-04.pdf>, 2011.
- [9] POLITI C T, HAUNSTEIN H, SCHUPKE D A, *et al.* Integrated design and operation of a transparent optical network: a systematic approach to include physical layer awareness and cost function[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2007, 45(2):40-47.
- [10] TAUNK C, BIDKAR S, SARADHI C, *et al.* Impairment aware RWA based on a k -shuffle edge disjoint path solution (IA-KS-EDP)[A]. *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference on Optical Networking and Impairments*[C]. Los Angeles, California, USA, 2011.
- [11] PEREIRA H, CHAVES D, BASTOS C. OSNR model to consider physical layer impairments in transparent optical networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2009, 18(2):137-149.
- [12] CHRISTODOULOPOULOS K, MANOUSAKIS K, *et al.* A multicost approach to online impairment-aware RWA[A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, ICC '09*[C]. Dresden, Germany, 2009. 1-6.
- [13] AZODOLMOLKY S, POINTURIER Y, ANGELOU M, *et al.* A novel impairment aware RWA algorithm with consideration for QoT estimation inaccuracy[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, 3(4):290-299.
- [14] DAHAN D, MAHLAB U, TEIXEIRA A, *et al.* Optical performance

monitoring for translucent/transparent optical networks[J]. *IET Optoelectronics*, 2011, 5(1):1-18.

- [15] FLORIDIA C, ROCHA M D L, MORAES J C D, *et al.* High accuracy and fast acquisition time of polarisation nulling-based OSNR monitor[J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(2):152-153.

- [16] AGRAWAL G P. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. San Diego: Academic Press, 2001.

作者简介:



赵继军 (1970-), 男, 河北邯郸人, 博士后, 河北工程大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为下一代光网络。



郭昆 (1986-), 男, 河北邢台人, 河北工程大学硕士生, 主要研究方向为损伤感知光网络。



李志华 (1978-), 女, 河北邯郸人, 博士, 河北工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为宽带接入技术。



王丽荣 (1973-), 女, 河北邯郸人, 硕士, 邯郸职业技术学院工程师、教师, 主要研究方向为光网络路由技术。



赵文玉 (1974-), 男, 甘肃定西人, 博士, 工业和信息化部电信传输研究所高级工程师, 主要研究方向为高速光纤通信网络。