

清华大学
博士学位论文
WDM+EDFA光通信系统仿真及对系统中四波混频效应的研究
姓名：郑浩成
申请学位级别：博士
专业：物理电子学
指导教师：周炳琨;谢世钟
19990401

中文摘要

在 $1.55\mu\text{m}$ 波段,采用波分复用(WDM)技术与掺铒光纤放大器(EDFA)结合已成为光纤通信传输系统特别是长途干线通信传输系统发展的主流方向。本论文开展了对此类系统的仿真、试验及传输子系统中非线性效应的作用和抑制方法的研究,主要包括:

应用信号处理工作系统(SPW)软件,在惠普(HP)工作站上开展了构建强度调制-直接检测(IM-DD) WDM光通信系统中伪随机码发生器、半导体激光器(LD)、单模光纤、EDFA和接收与判决模块的仿真研究工作,并仿真研究了典型光通信系统的特性。其中对于EDFA仿真模块进行了较详细的分析。仿真模块考虑了前向及后向放大的自发辐射(ASE)噪声。通过仿真计算EDFA模块,优化设计了掺铒光纤(EDF)的长度。在含8级EDFA的WDM光通信系统的仿真中实现了模块的系统应用。通过对以上各模块和国内、外试验及其他研究者发表的仿真结果比较,发现彼此结果相近,从而间接证明了本论文各仿真模块的可靠性。在此基础上,本论文还利用已构建的仿真光通信系统,开展了系统非线性特性方面的研究。这一方面的工作主要集中于WDM光通信系统中四波混频(FWM)特性的研究。

在长距离的WDM传输系统中,因采用不等间距信道技术抑制FWM而导致占用较宽的传输带宽,从而与级联EDFA及整个系统的传输带宽产生矛盾。本论文首次提出了比特相位调整RZ码技术与WDM系统中不等间距信道技术相结合的方案。该方案不仅解决了这一矛盾,而且还有助于更进一步的抑制因FWM而导致的信道串扰。本论文给出了该方案在减小总传输带宽和降低功率耗尽方面的理论分析,并实现了仿真论证。从理论和系统仿真两方面证实了该方案的有效性。

首次应用高斯噪声近似和功率耗尽公式的级数展开,推导了在应用DSF光纤的WDM系统中,受FWM效应限制的信道最大可允许输入功率的

些流动特征，但又不同于一般的绕流。其绕流物的双曲线型变截面特征、流动过程中的强浮力流性质以及内外流场的耦合作用使得该流动与其他的绕流流动有着较大的差异。论文通过基于相似准则的模型实验研究与基于有限体积方法求解 RANS 方程的数值模拟研究，全面系统地研究并阐述了横向风影响下空冷塔及塔群空气动力与热力性能的主要特征，尤其对于双塔流动的研究，呈现出许多不同于单塔绕流的新的流动特征，塔内复杂的涡旋上升运动、塔外的双马蹄涡结构以及双塔间相互干扰影响下复杂的流动形态无不显示出该种流动的复杂流体力学和热力学特征。研究结果清晰地揭示出了横向风下空冷塔出力下降的主要部位—空冷塔散热器侧向 80-120 度，以及主要影响原因—侧向绕流、塔内轴向涡、出口风盖。在此基础上，论文就若干简洁改进措施进行了比较研究，得到了可观的改进效果。研究表明，在塔内外合理布置挡风或导流设施是解决横向风对空冷塔不利影响的有效途径，而在塔侧 90 度附近设置挡风墙的方案是一个简单但高效的改进方法，能恢复 50%左右散热量，论文就挡风墙的几何尺寸优化进行了进一步的比较研究。论文的最后在综合模型实验及数值实验结果的基础上提出了一个相对切实可行的有关空冷塔防风问题的综合治理方案。

关键词：空冷塔，湍流绕流，数值模拟，模型实验

Calculation examples agree well with the experimental results in published papers. Using this formula, we can easily obtain the maximum channel input power limited by FWM.

Dispersion compensation by mid-span spectral inversion can be achieved through FWM in semiconductor optical amplifier (SOA). FWM in SOA is studied. we perform 1) the -20dB spectral inversion by four-wave mixing in a 10dB gaining SOA, and dispersion compensation by mid-span spectral inversion is used to achieve the transmission of 12-ps RZ code over 203-km dispersive fibre, and 2) the -16dB spectral inversion by four-wave mixing in a 27dB gaining SOA, and dispersion compensation by mid-span spectral inversion is used to achieve the transmission of 10Gb/s signals over 200-km dispersive fibre.

Key words: Optical communications, Simulation on optical communications, FWM, mid-span spectral inversion.

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得清华大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名： 郑浩成 日 期： 99.6.23

关于论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

签 名： 郑浩成 导师签名： 谢世钟 日 期： 99.6.23

表1-1给出了截至99初一些具有代表性的试验系统及系统主要技术特点。

表1-1 国外高速光纤通信系统的发展近况

系统研究 单位	时 间	传输 容量	调制	光纤	传输 距离	技术特点
NTT	99 [24]	160Gb/s ×19	LN-MOD	DSF	40km	WDM系统, 采用了超 窄线宽光源和70nm 增益平坦EDFA
Tyco Submarine Systems, Ltd.	99 [27]	10Gb/s ×64	Forward Error Correction coding	特殊 混合	7200 km	WDM系统, 15.1nm 总传输带宽, 实现了 0.33(b/s)Hz的 谱利用率
Lucent	99 [28]	40Gb/s ×25	LN-MOD	True wave	342 km	WDM系统, 应用负色散斜率 补偿光纤补偿色散
C.U. Univ. of Sweden	99 [29]	80Gb/s	锁模 激光器	SMF	172 km	OTDM 孤子传输
Alcatel	98 [26]	10Gb/s		DSF	20000 km	光纤环路传输

在光纤通信系统仿真研究方面, 目前国际上有代表性的仿真软件列举如下[30-31]:

- 光电、光子和先进激光仿真系统(OPALS)，由澳大利亚墨尔本大学开发完成。该软件是可仿真光通信器件、电路和系统的可视化仿真系统。该软件具有开放的用户接口并可仿真系统模块的非线性和噪声特性等。
- Comsis，由法国ipsis公司开发完成。是用于分析和设计通信系统的交互仿真软件包。其光模块库包括光源、光放大器、光纤和光电探测器等。

此外，一些典型的光通信系统仿真软件还包括：由rsoftinc开发的BeamProp Version 2.0，由英国photond开发的i-Cladiss，由Crosslight Software Inc. 开发的Lastip，dilas-II，PICS-3D等。

在中点谱反转色散补偿技术的研究方面一些有代表性的最新成果列举如下：

- 德国U. Feiste等人在1998年[32]报道了利用两个SOA的偏振分极方案，实现了40Gb/s，434km常规单模光纤中点谱色散补偿传输。
- Fujitsu公司的S. Watanabe等人[33]报道了利用中点谱反转技术40Gb/s×5，105km常规单模光纤传输。该试验第一次将中点谱反转色散补偿技术应用于WDM系统之中，展示了该技术的广阔应用前景。

当前高速光纤通信技术的研究热点主要涉及：

1.3 论文背景、工作的主要内容及成果

1.3.1 论文背景、工作的主要内容

基于以上对高速光纤通信系统发展状况和趋势的分析，下一代的光纤干线通信将主要是以10Gb/s单信道速率为基础的WDM系统。考虑到此类系统研究中的以下三方面因素：

- 系统特性研究“成本”和复杂程度提高，例如，10b/s的误码测试仪需RMB300万元左右，其他测试仪器和系统组成模块也以RMB10万元为基础；系统对信号源调制啁啾更“敏感”，受色散和非线性限制更为严重。因此通过系统仿真可以进行有效的系统特性研究。
- 在采用DSF的10Gb/s WDM系统中，FWM效应对系统特性的影响严重。
- 在未采取色散补偿措施的情况下，10Gb/s的信号在常规单模光纤中传输距离仅为60km左右。利用MSSI技术可以有效地进行色散补偿和非线性抑制。

为此，本论文结合课题组承担的国家“863”计划的课题一“光电子器件试验床向10Gb/s改造升级项目”、“10Gb/s半导体光放大器中点谱反转器”，以及“清华国家重点实验室开放基金资助课题一光纤通信系统传输和非线性特性仿真计算”，对10Gb/s或更高速率的WDM系统进行了研究，主要包括：

本论文对光通信系统的仿真工作主要利用了当前国际上最为流行的EDA设计软件之一：运行于HP(惠普)工作站的SPW通信仿真软件包[4]。在HP工作站上利用SPW进行光通信系统的仿真，克服了PC机仿真的缺点，具有运算精度高、运行速度快，可利用已有通信仿真应用软件包的优点。

本章主要利用SPW软件，在HP工作站上开展了构建强度调制-直接检测(IM-DD)光通信系统中伪随机码发生器、半导体激光器(LD)、单模光纤、参铒光纤放大器(EDFA)和接收与判决模块的仿真研究工作，并仿真研究了典型光通信系统的特性。通过和国内、外试验及其他研究者发表的仿真结果比较，发现彼此结果相近，从而间接证明了本仿真软件模块的可靠性。在此基础上，本论文还利用已构建的仿真光通信系统，开展了系统非线性特性的研究，主要集中于WDM光通信系统中四波混频(FWM)特性的研究。

2.1 SPW软件及SPW软件下的系统仿真简介

2.1.1 SPW软件简介

SPW(Signal Processing Worksystem)软件是由Cadence公司在HP工作站上，UNIX操作系统下利用C语言开发的通信系统专用仿真软件。该仿真软件具有模块化的结构、图形化的良好界面及可扩展性，它提供了交互交换数据、仿真、测试和实现通信系统的所有工具。

本论文利用SPW仿真软件仿真了光纤通信系统，得到了更为精确、灵活和直观的仿真结果。

图2-1为SPW软件主要组成部分示意图。从图中可以看到SPW软件主要包括以下几部分：1) 文件管理器 2) 信号计算器 3) 框图编辑器 4) 滤波器设计系统[4]。

滤波器设计系统(FDS-Filter Design System)是用于交互设计和分析带有实系数值的IIR和FIR数字滤波器的一种软件工具,在给定一组设计技术规范时,FDS计算实现该滤波器必须的滤波系数,当系数决定后,FDS图形化的绘出频率响应、冲击响应和滤波器的零、极点位置。

SPW还包括一个HDS(HDS-Hardware Design System)附加软件包,使系统具有定点仿真和综合能力。HDS精确地建立定点数字信号处理系统的行为级模型,然后在结构级指定硬件实现方案。HDS还可以用Verilog和VHDL描述的HDL,生成结构级设计来完成硬件综合过程自动化。

2.1.2 SPW软件下的光通信系统仿真

应用SPW进行光通信系统仿真,有赖于对光通信系统的分析,尤其是对光通信系统各组成部分的物理特性的分析和归纳,建立起数学模型,并用模块来实现这种模型。继而实现对系统其它方面的分析,如光通信系统的非线性研究。

本论文采用的SPW通信仿真软件包,具有很多优点,为光通信系统的仿真提供了很多便利之处。SPW通信仿真软件包不仅为系统仿真者提供了一个自上而下(Top-down)的设计工具外,还提供了丰富的模块库(包括信号源模块、滤波器模块、信道和噪声模块及分析和统计模块等)。通过这些设计工具和模块,用户可以根据自己的要求,利用已有通用的模块或依据它提供的标准格式编写专用模块,建立系统进行仿真。其优点就在于为用户提供了大量的通用通信模块,使用户能够在此基础上,集中精力于专用模块的编程及对特定研究对象的分析,从而节

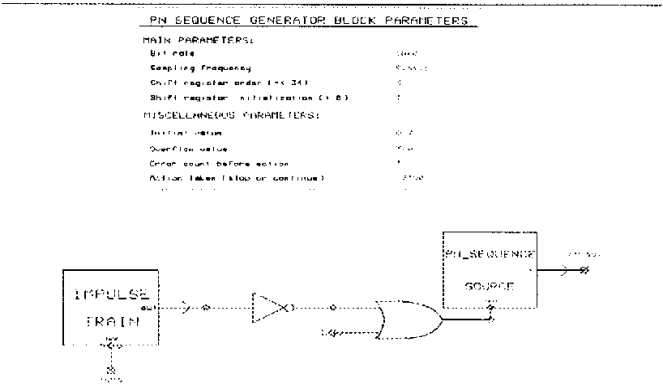
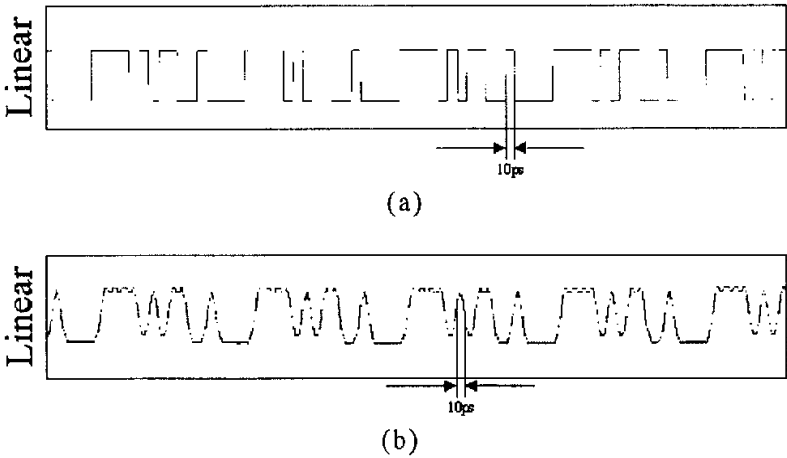


图2-4 伪随机码发生器仿真模块



(2.1) 式解释了载流子在有源区的产生与复合的物理机制。其中右边三项分别表示注入有源区的新载流子的速率、因自发辐射复合而导致的载流子减少的速率、因受激辐射复合而导致的载流子减少的速率。

(2.2) 式解释了光子产生与减少的物理机制。其中右边三项分别表示受激辐射导致的光子数增加的速率、由激光输出和吸收导致的光子数的减少、由自发辐射导致的光子数增加的速率。

在任意信号电流 $I(t)$ 的调制下，以上速率方程可数值模拟求解，产生如下含相位信息和幅度信息的复光场输出：

$$\hat{E}_{out}(t) = k[S(t)]^{1/2} \exp[j\phi(t)] = [P(t)]^{1/2} \exp[j\phi(t)] \quad (2.3)$$

上式中，

$$P(t) = k^2 S(t)$$

$$k^2 = V\eta h\nu / 2\Gamma\tau_p$$

上式中， η 为激光器的量子效率， h 为普郎克常数。

相位 $\phi(t)$ 由下式给出：

$$\phi(t) = 2 \int_0^t \Delta\nu(t') dt' \quad (2.4)$$

其中

</

对于光电接收模块的仿真，本论文应用了平方率检波器，并用一低通滤波器滤去高频成分[12]。

光电接收模块的仿真流程图如图2-11所示。

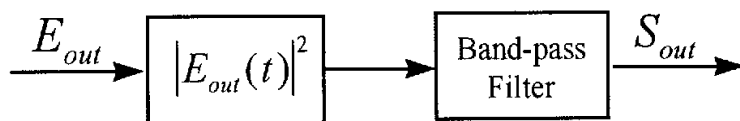


图2-11 光电接收模块的仿真流程图

在仿真光电接收模块时，本论文应用了SPW软件中的滤波器等已有模块。

2.2.1.5 BER 模块仿真

在光纤传输系统中，系统的误码率将因光信号的噪声、光纤的色散和光纤的非线性效应而增加。尽管在接收端，最终光噪声的概率密度公式不是严格的高斯噪声模式，但高斯噪声近似还是可以很好地用于误码率(BER)决定[13]。在高斯噪声近似的情况下，BER可以表示为

$$BER = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{|\mu_1 - D|}{\sigma_1} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{|\mu_0 - D|}{\sigma_0} \right) \right\} \quad (2.1$$

