

摘 要

光纤通信系统正向高速率、宽带、大容量、长距离的方向发展。密集波分复用技术作为目前干线光纤通信应用得最广泛的技术,也得到了长足的发展。信道速率的提高直接导致了入纤功率的增加,同时大容量传输要求在现有的通信窗口中进一步减小信道间隔,使得以前通常被忽略的非线性效应凸现出来。这就要求未来的光纤放大器不仅要有平坦的增益,而且要有宽带宽和任意波段可放大的特性,同时在放大方式上应该采用分布式放大。目前,光纤喇曼放大器是唯一能满足上述要求的光放大器,因此得到了越来越多的重视,吸引了越来越多的人从事这方面的研究工作。本文主要从光纤喇曼放大器的理论出发,在VPITransmissionmaker仿真平台上对宽带光纤喇曼放大器及其与掺铒光纤放大器组成的混合光纤放大器的设计、特性以及对高速光纤通信系统的性能影响进行了仿真研究。

第二章首先介绍了光纤喇曼放大器的原理,在此基础上搭建了光纤喇曼放大器理论模型,建立了功率分析和模场分析模型,并对以后仿真中将要用到的喇曼增益谱曲线,光纤损耗曲线以及色散曲线进行了拟合,最后介绍了一些光子设计自动化仿真软件和本文主要使用的仿真工具——VPITransmissionmaker。在第三章中研究了两类光纤喇曼放大器对单信道高速光纤通信系统性能的影响,并对各自系统进行了优化设计。

第四章的研究内容为宽带光纤喇曼放大器的设计及其在波分复用高速光纤通信系统中的应用。首先对一种快速宽带光纤喇曼放大器的设计方法进行了介绍,通过该方法可以快速设计出任一波段的增益可控制的宽带光纤喇曼放大器,接下来对宽带光纤喇曼放大器特性进行了仿真研究,得到了泵浦光与信号光,信号光与信号光,泵浦光与泵浦光之间相互作用的一些有用的结论,并对宽带光纤喇曼放大器的噪声特性进行了研究;最后在VPITransmissionmaker仿真试验平台上,对基于宽带光纤喇曼放大器的波分复用高速光纤通信系统进行了较详细地研究,得到了色散补偿光纤的配置、光纤喇曼放大器的色散系数、色散斜率、有效模场面积、非线性系数、后向瑞利散射系数、入纤功率、Bessel滤波器带宽以及光纤喇曼放大器长度对系统误码率的影响关系,同时对严重影响长距离光纤传输系统性能的后向瑞利散射噪声对光信噪比及误码率的影响也作了较详细地研究。

第五章对宽带混合光纤放大器及其在波分复用高速光纤通信系统中的应用进行了研究。首先介绍了一种混合光纤放大器的设计方法,接下来设计了一个宽带混合光纤放大器,并对该宽带混合光纤放大器增益特性和噪声特性进行了仿真

研究。最后我们提出了一种用光滤波器抑制噪声的有效方法，并将该方法应用于波分复用高速光纤通信系统中，在 VPI TransmissionMaker 仿真试验平台上，对入纤功率、光纤喇曼放大器的色散系数、色散斜率、有效模场面积、非线性系数、Bessel 滤波器带宽、光纤喇曼放大器长度以及非归零码中 1 码出现的概率对系统误码率的影响进行了仿真研究。

本文结合理论分析和数字仿真，对光纤喇曼放大器和混合光纤放大器的设计、特性及其对高速光纤通信系统的性能影响进行了研究，所获得的结果对基于光纤喇曼放大器和混合光纤放大器的大容量、宽带、长距离波分复用系统的设计具有参考意义。

关键词 波分复用 掺铒光纤放大器 光纤喇曼放大器 混合光纤放大器

Abstract

The optical fiber communication systems are developed into high-speed, wide-band and long-distance optical fiber communication systems with huge capacity. As the most widely used method in the backbone communication networks, dense wavelength division multiplexing technology has made remarkable progress. The enhancement of the transmission speed leads to the increase of the input power, at the same time the transmission with huge capacity needs the further reduction of the channel separation in the existing communication windows. All of this makes nonlinear effects which has been ignored in the low-bit rate linear systems distinguished, which brings forward the new request of optical fiber amplifiers. The future amplifiers must be the distributing amplifiers, which have not only flat gain but also wide-band and the characteristic of the arbitrary band amplification. As far as it goes, fiber Raman amplifiers are the sole amplifier which can be competent. More and more people pay attention to fiber Raman amplifier and research on it. This work studies not only the design method and characteristics of fiber Raman amplifiers and hybrid fiber amplifiers which are composed of fiber Raman amplifiers and Erbium-doped fiber amplifiers but also the influence of fiber Raman amplifiers and hybrid fiber amplifiers on wavelength division multiplexing systems, on the base of the theory of fiber Raman amplifiers and VPITransmissionmaker simulation platform.

In chapter 2, the theory of fiber Raman amplifiers is introduced firstly. On the base of it, the theory model of fiber Raman amplifiers including power analysis model and field analysis model is based. Then the Raman gain spectrum, the fiber loss spectrum and the fiber dispersion spectrum which will be used in the future research are simulated. Finally some photonic design automation simulation software and the simulation platform mainly used in this work — VPITransmissionmaker are introduced. In chapter 3, the influence of two kinds of fiber Raman amplifiers on a single 40Gb/s system is studied and the optimal designs of each system are given.

The fast design method of broadband fiber Raman amplifiers is introduced in chapter 4. Using the method, the gain-controlled broadband fiber Raman amplifiers in arbitrary band can be designed quickly. After the characteristics of broadband fiber Raman amplifiers are studied, some useful conclusions on the mutual effects between pumps and signals, pumps and pumps, signals and signals are deduced. The noise

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，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，也不包含为获得电子科技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谢意。

签名: 薛 日期: 2024年 3月 9日

关于论文使用授权的说明

本学位论文作者完全了解电子科技大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权电子科技大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后应遵守此规定)

签名: 薛 导师签名: 张
日期: 2024年 3月 9日

简 略 字 表

TDM	Time Division Multiplexing	时分复用
OTDM	Optical Time Division Multiplexing	光时分复用
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波分复用
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	半导体光放大器
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier	掺铒光纤放大器
FRA	Fiber Raman Amplifier	光纤喇曼放大器
HFA	Hybrid Fiber Amplifier	混合光纤放大器
FBA	Fiber Brillouin Amplifier	光纤布里渊放大器
TW	Travelling Wave	行波
SRS	Stimulated Raman Scattering	受激喇曼散射
SBS	Stimulated Brillouin Scattering	受激布里渊散射
FWM	Four Wave Mixing	四波混频
TDFA	Thulium-Doped Fiber Amplifier	掺铥光纤放大器
PDFA	Praseodymium-Doped Fiber Amplifier	掺镨光纤放大器
DCF	Dispersion Compensation Fiber	色散补偿光纤
BER	Bit Error Rate	误码率
FRL	Fiber Raman Laser	光纤喇曼激光器
EDA	Electronic Design Automation	电子设计自动化
PDA	Photonic Design Automation	光子设计自动化
OCDMA	Optical Code Division Multiple Access	光码分多址
SONET	Synchronous Optical Network	光同步网
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	同步数字系列
ASE	Amplified Stimulated Emission	放大的自发辐射
PMD	Polarization Mode Dispersion	偏振模色散
SPM	Self-Phase Modulation	自相位调制
OSNR	Optical Signal Noise Ratio	光信噪比

第一章 绪论

1.1 引言

众所周知,光在长距离传输时,由于受发射功率、接收机灵敏度、光纤线路衰减,以及色散等因素的影响和限制,使得光脉冲从光发射机输出经光纤传输一定距离后,其幅度会受到衰减,波形也会出现失真^[1~11]。因此,要进行长距离的信号传输,就需要在光信号传输一定距离后加中继器,以放大衰减的信号,恢复失真的波形,使光脉冲得到再生^[12~16]。

传统的光纤中继器一般要经过光—电—光的转换过程,而不能把光信号直接进行放大。这种方式不仅给整个系统的可靠性、灵活性带来了许多问题,而且还使设备结构变得异常复杂。如何解决这个问题?人们自然想到可否不经过光—电—光的转换,而直接将已衰减掉的光信号进行放大。光放大器的研制成功,标志着这一问题得到圆满解决,也标志着光纤通信技术进入了一个崭新的发展阶段。

目前,我们正处于日新月异的信息时代,电信网、因特网、有线电视网迅速壮大并开始走向融合,人类活动的诸多方面正变得与信息网络密不可分,全球通信业务量正以惊人的速度迅速增长,业务种类也日渐多样化,这对信息传输速率及网络通信容量提出了越来越高的要求,据有关保守估计,到2005年仅美国对因特网通信容量的需求就将超过280Tb/s。普遍认为通过传统的时分复用(TDM)来提高单波长信道的传输速率,其最大量值在40Gb/s左右,而采用光时分复用(OTDM)也只能将单波长传输速率提高到上百个Gb/s左右,况且目前OTDM技术尚欠成熟。显然,单靠传统的复用技术来提高单波长传输速率以满足目前对通信容量需求的增长已是不可行的。为解决对通信容量呈指数增长的需求,人们引入了一种在光波长域内对信道进行复用的技术,这就是波分复用(WDM)技术,即在同一根光纤上同时用多个波长来分别传送不同信道的信号^[17~19]。鉴于光纤的巨大带宽潜力,WDM技术能极大的满足目前对通信容量需求的增长。可以说,TDM+WDM或OTDM+WDM是解决传输速率和通信容量问题的最理想技术途径。

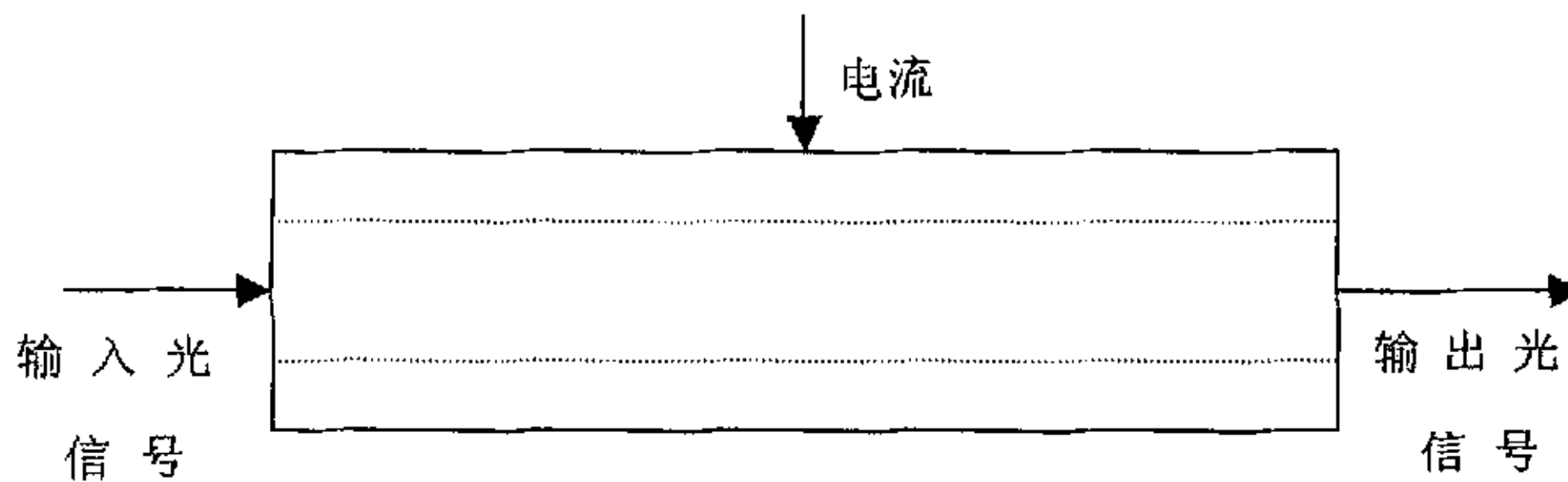
点到点波分复用技术解决了通信容量需求问题,但同时也对传统的光/电/光交换和路由设备带来了沉重的负担,这就是所谓的“电子瓶颈”问题。为了克服交换上的电子瓶颈限制,实现大容量的信息交换,一种采用光节点技术的全光网络应运而生。WDM全光网络以WDM传输及波长路由技术为物理平台,

以光放大技术为关键技术，在网络中任意一对信源和信宿终端间建立起透明的全光传送通道^[20~28]。WDM 全光网络具有容量大、透明性、可重构性、易扩容性等优点，代表了未来光通信网络的发展方向^[29~45]。因此，对 WDM 全光网络的研究具有重大的战略意义和经济价值，已成为国际国内在光纤通信领域内的研究前沿和热点领域。

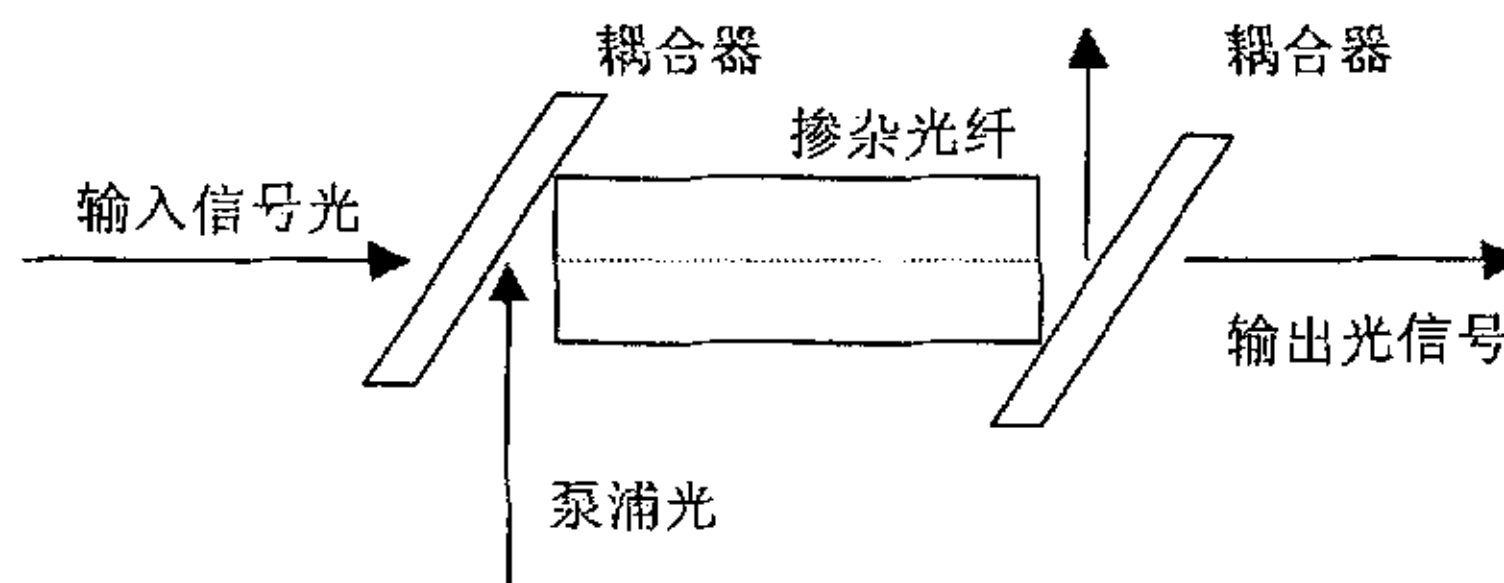
为适应光纤通信发展的需要，光放大器正在向宽带化、大功率化、高增益和高平坦度方向发展^[46~49]。现在已实用化的光放大器是半导体光放大器(SOA)和掺铒光纤放大器(EDFA)，当前研究的热点在光纤喇曼放大器(FRA)以及由EDFA和FRA组成的混合光纤放大器(HFA)^[50~60]。

1.2 光放大器的类型与发展

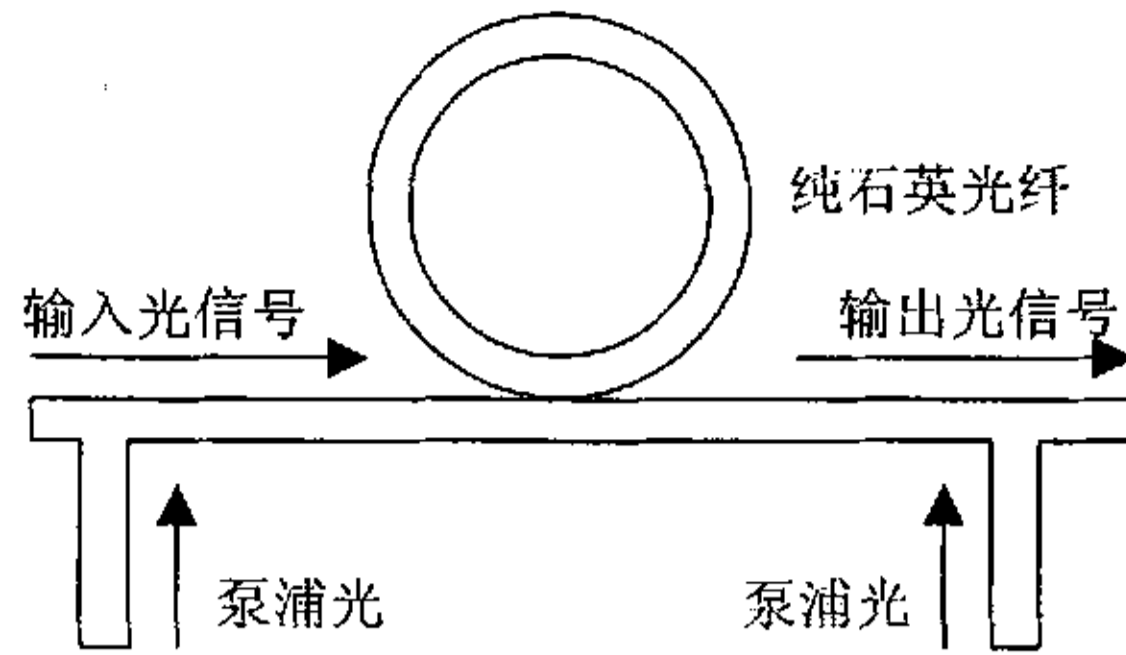
一般，光放大器都由增益介质、泵浦源、输入输出耦合结构组成。根据光放大器工作波长不同可分为 $0.8\ \mu\text{m}$ ， $1.3\ \mu\text{m}$ 和 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段放大器。根据光纤放大器增益高低，掺杂浓度和长度的不同可分为集总式光纤放大器和分布式光纤放大器。根据增益介质的不同，可分为两类光放大器，一类是采用活性介质，



1-1 半导体光放大器



1-2 掺铒光纤放大器



1-3 受激散射光纤放大器

如半导体材料和掺稀土元素 (Nd, Sm, Ho, Er, Pr, Tm 和 Yb) 的光纤, 利用受激辐射机制实现光的直接放大, 如半导体激光放大器和掺杂光纤放大器; 另一类基于光纤的非线性效应, 利用受激散射机制实现光的直接放大, 如光纤喇曼放大器和光纤布里渊放大器 (FBA)。图 1-1、1-2、1-3 给出了这几种放大器的基本结构示意图。

1.2.1 半导体激光放大器

半导体激光放大器利用半导体材料固有的受激辐射放大机制, 实现相干光放大, 其原理和结构与半导体激光器相似。当偏置电流低于振荡阈值时, 激光二极管对输入的相干光具有线性放大作用^[61]。当偏置电流高于振荡阈值时, 激光二极管可作为非线性放大器。线性放大器可分为两类: 法布里—珀罗 (F-P) 光放大器和行波 (TW) 光放大器, 两者的区别在于两个端面的反射率不同, F-P 腔光放大器端面反射率高, 光在两端面间来回反射, 产生共振放大。TW 光放大器端面反射率很低, 光在沿介质行进过程中被放大, 然后由输出端面输出, 而不产生反射。在 60 年代半导体激光二极管尚未成熟, 但已在 77K 下, 首先进行了 GaAs 同质结行波半导体放大器的研究, 开创了半导体光放大器研究的先河, 确立了半导体光放大器的基本理论。至 1970 年, 双异质结结构 (DH) 激光器问世后, 又实现了 TW 半导体光放大器的室温连续工作。在 1973 年至 1975 年间, 开始从光纤通信应用要求出发, 研究双异质结结构 TW 和 F-P 光放大器的特性并取得重要进展。80 年代初, 采用消除反射光的光隔离器和精确的光频率调谐技术, 深入研究了 AlGaAs F-P 光放大器的增益、带宽、饱和增益与噪声特性及其对光纤通信系统性能的影响, 同时开始研究半导体放大器的注入锁定现象和放大特性。随着光纤通信技术的发展, 80 年代中期开始研究适用于 $1.3 \mu\text{m}$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ 波长的 InGaAsP 半导体光放大器^[62]。

1.2.2 掺杂光纤放大器

60年代初,在对半导体光放大现象研究的同时,也对掺稀土元素的光纤的光谱特性进行了研究, Koesker 发现了掺 Nd 光纤的激光辐射现象, Snitzer 发现了掺铒光纤在 $1.5\ \mu\text{m}$ 处的激光辐射特性^[63], 当时这些研究都是期望研制稀土光纤激光光源而不是光纤放大器, 由于稀土光纤的热淬灭效应难以解决, 而半导体激光器发展迅速并且日趋成熟, 因此稀土光纤放大器的研究处于停步不前状态。在 1985~1986 年间, 英国南安普顿大学的 Payne 等人有效地解决了掺铒光纤的热淬灭问题, 首次用 MCVD 方法研制成纤芯掺杂的铒光纤, 并实现了 $1.55\ \mu\text{m}$ 低损耗窗口的激光辐射^[64-65], 1987 年他们采用 650nm 染料激光器作为泵浦光源, 获得了 28dB 小信号增益。同年 AT&T Bell 实验室的 Desurvire 等人, 采用 514nm 氩离子激光器作为泵浦光源, 也获得了 22.4dB 小信号增益。接着在 1989 年, 他们利用 $1.49\ \mu\text{m}$ 半导体激光器作为泵浦光源获得了 37dB 小信号增益, Laming 等利用 980nm、11mW 泵浦功率也得到 24dB 小信号增益, 同年日本 NTT 实验室首次利用 $1.48\ \mu\text{m}$ 半导体激光器泵浦的掺铒光纤放大器作为全光中继器放大 5Gb/s 孤子脉冲, 实现了 100km 的无误码传输。自此以后, 掺铒光纤放大器的研究在多方面开展, 建立了多种理论分析模型, 提出了增益均衡和扩大增益带宽的方案和方法, 进行了多种系统应用研究, 同时进行了氟化玻璃铒光纤放大、分布式光纤放大器和双向放大器的研究, 使掺铒光纤放大器及其应用得到了飞速发展。此外又开展了掺镨 (Pr)、掺镱 (Yb)、掺钬 (Ho)、掺铥 (Tm) 等放大器的研究, 使光纤放大器的研究全面开展。

1.2.3 受激散射光纤放大器

60年代初,随着激光技术的发展,受激喇曼散射 (SRS)、受激布里渊散射 (SBS)、四波混频 (FWM) 和参量过程的物理机制逐步被揭示^[66-67]。1972 年 Stolen 等首先在光纤喇曼激光器的试验中发现了喇曼增益, 初期的研究主要侧重于制成光纤喇曼激光器, 直到 80 年代才在光纤通信应用的推动下开始研究喇曼光放大器。1981 年 Tkeda 采用 $1.017\ \mu\text{m}$ 的泵浦光放大 $1.064\ \mu\text{m}$ 的信号光, 经 1.3km 单模光纤, 获得 30dB 小信号增益。1983 年 Desurvire 等用 2.4km 单模光纤放大 $1.24\ \mu\text{m}$ 的光信号, 获得 45dB 的小信号增益。1986 年 Olsson 用光纤喇曼放大器作为光纤通信系统接收机的前置放大器。1987 年 Edagawa 研究了光纤喇曼放大器的宽带多信道放大特性。1989 年 Mollenauer 采用 41.7km 的光纤环和 $1.46\ \mu\text{m}$ 的色心激光器泵浦源, 利用喇曼增益放大脉宽 55ps、波长 $1.56\ \mu\text{m}$ 的孤子脉冲, 使其稳定传输 6000km。

受激布里渊增益特性的研究开始于 1979 年, 其增益带宽一般小于 100MHz,

1986年 Olsson 和 Atkoms 等研究低泵浦功率的光纤布里渊放大器，采用几毫瓦的泵浦功率得到小信号增益 (20~40) dB 的窄带光放大。光纤布里渊放大器可作为选频光放大器用于频分复用光信道的解复用。

1.3 光纤喇曼放大器的优势

与其他光纤放大器相比光纤喇曼放大器具有以下几个突出的优点：

1)喇曼放大是一个非谐振过程，增益谱响应仅依赖于泵浦波长和泵浦功率，只要有合适的泵浦光源，就可得到任意波长的喇曼放大。

2)和大多数介质中在特定频率上产生喇曼增益情况相反，石英光纤中的喇曼增益可在很宽的范围内连续地产生，因此可用作宽带放大器。

3)通过合理选择泵浦波长，可以精确地确定喇曼增益谱形状和增益带宽，在补充和拓展掺铒光纤放大器的增益带宽方面表现出极其诱人的前景。

4)光纤喇曼放大器可与其它如掺铥光纤放大器(TDFA)、掺镨光纤放大器(PDFA)等级联，产生宽带、平坦的增益，可用于超宽带波分复用系统。

1.4 掺铒光纤放大器和光纤喇曼放大器在光纤通信系统中的应用

1.4.1 掺铒光纤放大器的应用

掺铒光纤放大器在常规光纤数字通信系统中的应用，可以省去大量的中继器，而且中继距离也大为增加，这对长途光缆干线系统具有重要意义。其主要应用包括：

1)长距离通信系统中的光中继放大器。传统的光中继器有许多局限性，例如，数字信号和模拟信号相互转换时，中继器要作相应的改变；设备由低速率改变成高速率时，中继器要随之更换；只能传输同一波长的光信号，且结构复杂、价格昂贵，等等。掺铒光纤放大器则克服了这些缺点，不仅不必随信号方式的改变而改变，而且设备扩容或用于波分复用时，也无需更换。EDFA 的频带宽，放大过程完全在光域进行，具有对调制格式、码速、码型全透明的优点。采用 EDFA，可使传输距离达几千至上万千米。例如，日本 NTT 实验室的 Imai 等使用 199 只 EDFA 将 2.5Gb/s 的光脉冲信号传输了 10073km。

2)可作光发射机的后置放大器和光接收机的前置放大器。作光发射机的后置放大器时，可将激光器的发送功率从 0dBm 提高到 10dBm。作光接收机的前

置放大器时，其灵敏度也可大大提高，同时可延长无中继传输距离。例如，美国 Bell 实验室的 Park 等于 1992 年分别采用 EDFA 作为光发射机的末级功放和光接收机的前放，实现了 2.566Gb/s、318km 的无中继传输，又于 1993 年实现了 5Gb/s、226km 的无中继的实用系统，并已投入商业应用。

3) 高速大容量多信道光纤通信系统中的宽带放大器。EDFA 具有很宽的增益带宽，最新的研究结果已达 80nm，这种宽带光放大器在光纤通信系统中结合波分复用或频分复用实现多信道同时放大，大大提高通信容量。例如日本 NTT 实验室 Takchi 等于 1992 年实现了 10×10Gb/s、500km WDM 多信道传输，Bell 实验室 Chraphyvy 等于 1993 年实现了 8×20Gb/s、300km 的 WDM 多信道传输。EDFA 以成为光纤通信系统扩容升级、降低成本最重要的系统组成单元。

4) 高速长距离光孤子通信系统中的孤子能量补偿放大器。EDFA 具有频带宽、功率大和放大超短光脉冲信号的能力，适宜于在光纤孤子通信系统中作为孤子能量补偿放大器，实现超高速长距离孤子传输。例如，美国 Bell 实验室 Mollenauer 等在 1991 年实现了 2.5Gb/s、15000km 孤子传输，在 1993 年实现了单信道 10Gb/s、20000km，双信道 10Gb/s、13000km 孤子传输，1995 年实现了 8×2.5Gb/s、9000km 孤子传输。

1.4.2 光纤喇曼放大器的应用

光纤喇曼放大器有两种类型，即分布式和集总式，各有特点^[68]。集总式光纤喇曼放大器是将放大器与传输线路分开，作成独立元件，因此要求其具有较高的增益，一般采用高掺锗，低损耗，小有效面积的光纤作为增益介质。由于集总式光纤喇曼放大器的增益和 EDFA 相比有一定的差距，并且需要较长的光纤(几公里左右)，因此主要用于放大一些 EDFA 不能放大的特殊波长，如 1.3 μm 窗口。分布式光纤喇曼放大器是以传输光纤作为增益介质的放大器，用它可以制成无损光器件，如无损色散补偿光纤，还可以制成 EDFA 的动态增益均衡器件用于弥补由于光纤老化，损耗上升而造成的增益不均衡。从目前的发展趋势来看，由于分布式放大器的优良特性，其应用范围已超过了集总式放大器。

目前关于光纤喇曼放大器应用于宽带放大的报道很多，总结起来主要有三种情况。一是光纤喇曼放大器独立使用，采用多波长泵浦，形成宽带放大；二是光纤喇曼放大器和 EDFA 构成混合放大器，再加上增益均衡器平坦增益以获得高增益的宽带放大；三是用光纤喇曼放大器制成有源无损器件或动态增益均衡器件^[69~73]。

1) 独立喇曼宽带放大器

其典型结构如图 1-4。

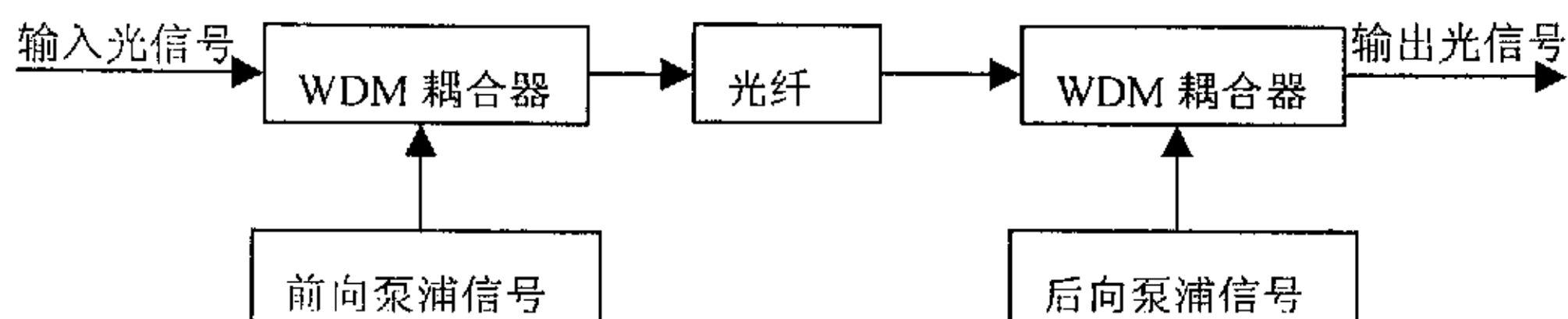


图 1-4 独立光纤喇曼放大器典型结构

在独立喇曼宽带放大器结构中，可以像上图中所示那样采用双向泵浦，也可以只采用前向泵浦或是只采用后向泵浦，在实际系统中，后向泵浦的噪声特性相对其它两种结构来说较好，因此在实际系统中普遍采用后向泵浦形式。当泵浦源采用多个时，可以实现超宽带喇曼放大。增益介质一般为普通单模光纤，但由于喇曼增益效率较低，因此为了获得更高的增益，通常采用掺锗光纤来代替普通单模光纤。

2) 喇曼+EDFA 混合放大器

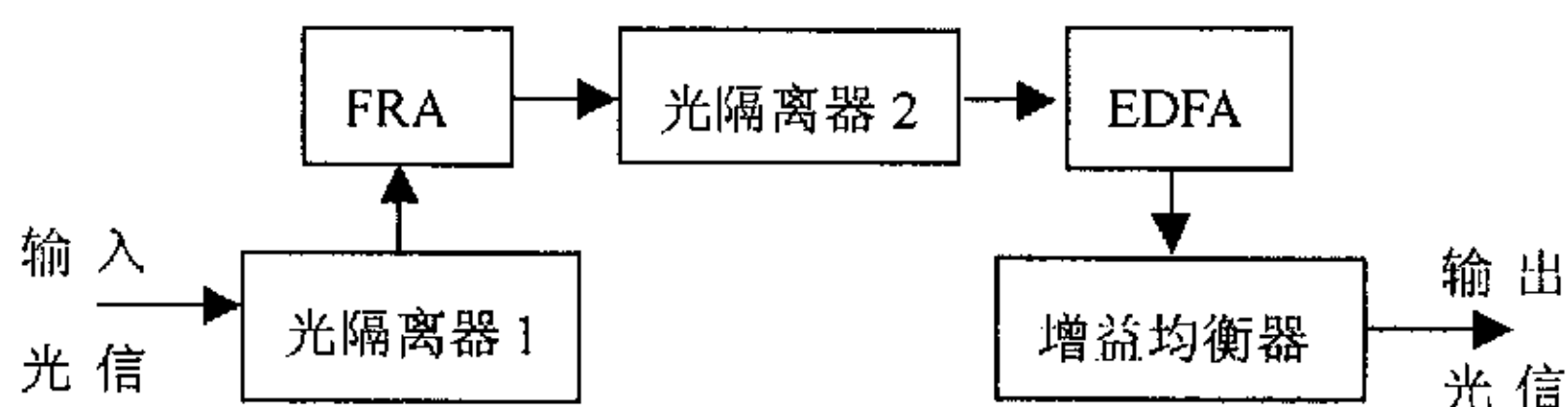


图 1-5 EDFA+喇曼混合放大器结构

由于 EDFA 技术已经相当成熟，和光纤喇曼放大器相比各有所长，因此目前最好的方法就是将两种放大器结合起来，用 EDFA 放大传统的 C 波段，用分布式或集总式光纤喇曼放大器放大 L 或 S 波段，以获得较大的增益。不过由于两种放大器的增益谱叠加后平坦性不好，一般要运用增益均衡器，典型结构如图 1-5 所示。

3) 喇曼有源器件

利用光纤喇曼放大器的分布增益特性，可以制成有源无损器件。例如给色散补偿光纤（DCF）加上泵浦源就可以获得无损色散补偿光纤，通过调节泵浦

光的强度和波长还可以改变增益特性，其典型结构与图 1-4 极为相似，只需将放大介质改为 DCF 即可。采用多个泵浦源时，通过调节泵浦源的输出功率和频率，可以使色散补偿光纤实现无损色散补偿。

1.4.3 掺铒光纤放大器和光纤喇曼放大器对系统性能影响比较

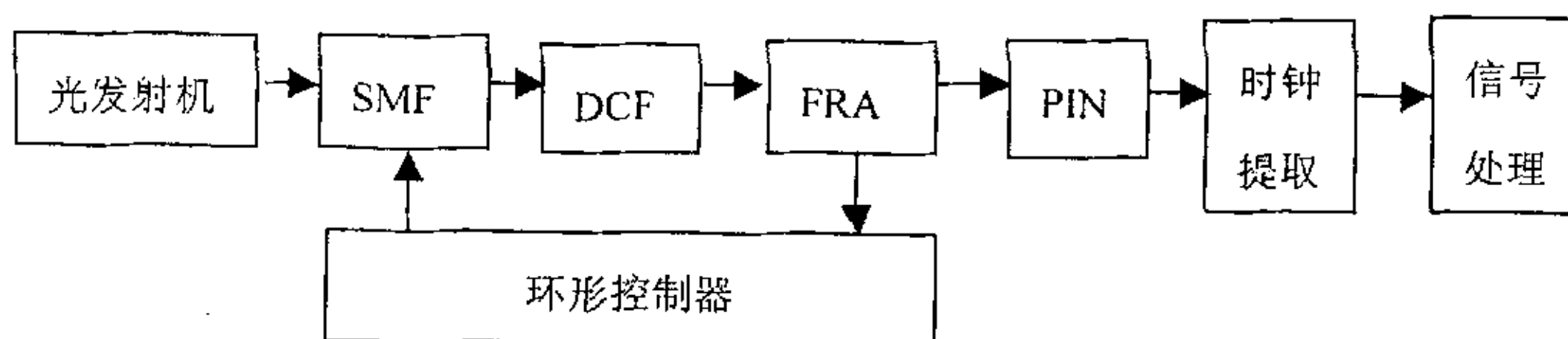


图 1-6 仿真系统结构原理框图

表 1-1 仿真时用到的各参数值

信道功率(单信道系统)	4mW	FRA 后向泵浦频率(功率)	205.4THz(2W)
信道频率(单信道系统)	193.1THz	信道功率(16路 DWDM 系统)	0.5mW
SMF 长度(单信道系统)	60.2km	SMF 长度(16路 DWDM 系统)	49.4km
信号速率	10Gb/s	DCF 的色散系数	$-90 \times 10^{-6} \text{s/m}^2$
EDFA 长度	7m	起始信道频率(16路 DWDM 系统)	192.725THz
DCF 和 SMF 模场有效面积	$80 \mu\text{m}^2$	EDFA 后向泵浦波长(功率)	980nm(150mW)
信道间隔	50GHz	SMF 的色散系数	$16 \times 10^{-6} \text{s/m}^2$
FRA 长度	2km		

为了比较 EDFA 和 FRA 对系统性能的影响，我们对两者分别应用于单信道和 16 路 DWDM 系统时误码率 (BER) 和 Q 值进行了对比。仿真系统的结构如图 1-6 所示。光发射机发出的信号光经环形控制器后进入光纤，光纤由三段组

成，从左至右分别是传输光纤（SMF），色散补偿光纤（DCF）和 FRA。通过环形控制器可控制光波传输距离。光波经过 3 周传输后，进入 PIN 光电二极管进行光电转换，得到的电信号再经时钟提取后进行信号处理。其余各参数如表 1-1 所示，表中与频率有关的参数均是频率为 193.1THz 处的值。

将 FRA 分别应用于上述研究的单信道光纤传输系统和 16 路 DWDM 系统，得到传输后的信号参数如表 1-2 所示。再将 EDFA 代替 FRA 分别应用于两个系统，其它参数和模块均不变，经传输同样距离后，得到传输后的信号参数如表 1-2 所示。从表中可以清楚的看到在传输相同距离后，用 EDFA 作光放大器的系统几乎不能正常工作，而用 FRA 作光放大器的系统仍保持较低的误码率。可见，在以 BER 为评判标准时，无论是在改善单信道系统的性能方面还是 DWDM 系统性能方面，FRA 较 EDFA 都有优越性，因此更适合在大容量长距离传输系统中应用。

表 1-2 EDFA 和 FRA 对系统性能影响的比较

不同条件	选项	BER	Q 值
经 FRA 放大传输后的信号(单信道)		4.01×10^{-14}	7.54
经 EDFA 放大传输后的信号(单信道)		2.43×10^{-6}	4.57
经 FRA 放大传输后的信号(16 路 DWDM 系统)		9.5×10^{-14}	7.35
经 EDFA 放大传输后的信号(16 路 DWDM 系统)		3.9×10^{-9}	5.76

1.5 光放大器的发展方向

超高速率、大容量、长距离光纤通信系统的发展对光纤通信领域的关键器件——光放大器在功率、带宽和增益平坦方面提出了新的要求，因此，在未来的光纤通信网络中，光放大器的发展方向主要有以下几个方面：

- (1) EDFA 从 C 波段向 L 波段发展
- (2) 超宽带大功率的 FRA
- (3) 将 EDFA 与 FRA 进行串联使用，获得超宽带的平坦增益混合光放大器
- (4) 研发具有动态增益平坦技术的光放大器
- (5) 小型化、集成化光放大器

1.6 论文工作安排

本文主要研究宽带光纤喇曼放大器及其与 EDFA 组成的混合光纤放大器的特性、设计方法及其在高速光纤通信系统中的应用。根据 1550nm 低损耗窗口的特点,依次对 S 波段(1450—1530nm)和 C+L 波段(1530—1625nm)进行了宽带光纤放大器的设计。在研究每个频段内的宽带光纤放大器时按照设计方法、特性和基于该放大器的高速光纤通信系统的顺序进行研究。

本文第二章研究了光纤喇曼放大器的原理及其理论模型。首先介绍了光纤喇曼放大器的原理,在此基础上搭建了光纤喇曼放大器的理论模型,建立了功率分析和模场分析模型,对喇曼增益谱以及色散曲线和损耗曲线进行了拟合,得到了误差极小的拟合函数表达式,为下一步进行仿真研究做好了准备,最后对仿真平台 VPITransmissionmaker 进行了介绍。

第三章对目前较常用的两类光纤喇曼放大器(基于 DCF 和基于传输光纤)在单信道高速光纤通信系统中的应用进行了研究,通过研究放大器自身参数对系统性能的影响,得到了基于光纤喇曼放大器的单信道高速光纤通信系统设计的一些结论,并对各自系统进行了优化设计,最后对两类光纤喇曼放大器对系统性能的影响做了比较。

第四章研究了宽带光纤喇曼放大器的设计及其在波分复用高速光纤通信系统中的应用。首先研究了宽带光纤喇曼放大器的设计及其增益控制的简单方法,通过该方法可以快速设计出增益可变的宽带光纤喇曼放大器,然后对宽带光纤喇曼放大器的特性进行了深入研究,得到了设计放大器时一些结论,最后对基于宽带光纤喇曼放大器的波分复用高速光纤通信系统进行了研究,得到了一些设计基于宽带光纤喇曼放大器的波分复用高速光纤通信系统时的结论。

第五章讨论了宽带混合光纤放大器的设计及其在波分复用高速光纤通信系统中的应用。首先介绍了一种混合光纤放大器的设计方法,接下来设计了一个宽带混合光纤放大器,并对该宽带混合光纤放大器增益特性和噪声特性进行了仿真研究。最后我们提出了一种用光滤波器抑制噪声的有效方法,在 VPITransmissionmaker 仿真试验平台上对基于宽带混合光纤放大器的波分复用高速光纤通信系统进行了研究。

第二章 光纤喇曼放大器原理及其理论模型

2.1 光纤喇曼放大器原理

光纤喇曼放大器是非线性光纤光学的重要应用。研究发现，石英光纤具有很宽的受激喇曼散射（SRS）增益谱，并在 13THz 附近有一较宽的主峰，如图 2-1 所示。如果一个弱信号与一强泵浦光波同时在光纤中传输，并使弱信号波长置于泵浦波的喇曼增益带宽内，弱信号光即可得到放

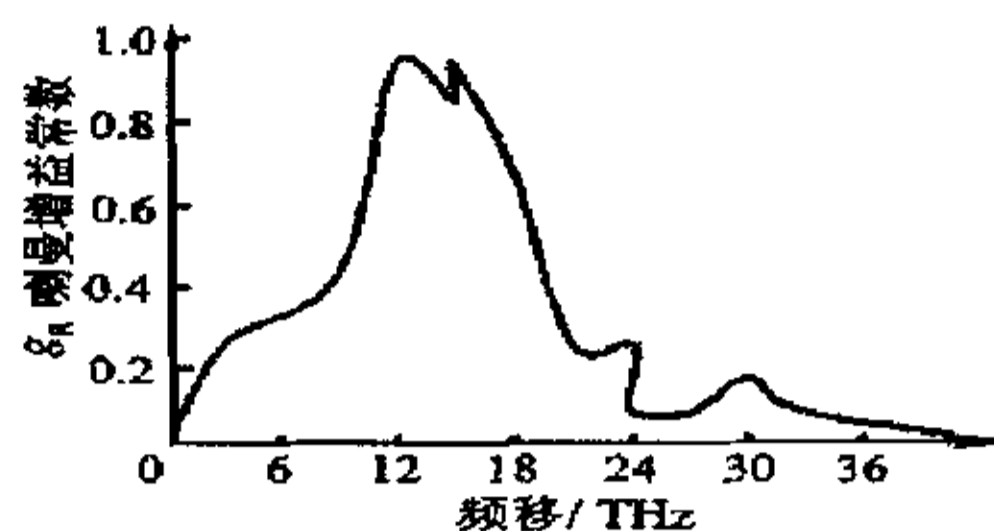


图 2-1 喇曼增益谱曲线

大，这种基于 SRS 机制的光放大器即称为光纤喇曼放大器（FRA）。如果在 FRA 两端设置合适的反射镜，亦可构成光纤喇曼激光器（FRL）^[74-80]。

当散射介质的分子具有分立的本征能级结构，而单色输入光的频率 γ_0 与分子任何一个共振吸收频率都不等时，分子本身不能对入射光子产生真正的共振吸收，但能对入射光产生散射作用，如图 2-2 和图 2-3 所示。设散射分子的两个最低能级分别为 a 和 c，能量间隔为 $h\Delta\gamma$ ，在入射光作用下，原处于较低能级 a 上的分子[图 2-2]在散射后先跃迁到一个中间状态（虚能级）之上，然后又跃迁返回至另一个较高能级 c，分子内能增加，而散射光子的频率则向低频方向移动了 $\Delta\gamma$ ，这种过程产生的散射光称为斯托克斯光。与此类似，图 2-3 的散射光称为反斯托克斯光，其特点是散射分子回到了较低能级，内能减少，而散射光子的频率向高频方向移动了 $\Delta\gamma$ 。由量子电动力学理论可得到光强为 $I(\gamma, 0)$ 的入射光在光纤中传输距离 z 后，受激散射光的光强 $I(\gamma, z)$ 为^[81]：

$$I(\gamma, z) = I(\gamma, 0) \exp(g_R z) \quad (2-1)$$

式中 g_R 称为斯托克斯喇曼散射增益因子，即

$$g_R = N_0 \sigma \frac{\lambda^2}{h\gamma_0 \Delta\gamma} I_0 \quad (2-2)$$

可见，受激喇曼散射的增益因子与散射过程初始能级上的分子密度 N_0 、分子微分截面 σ 和总泵浦光强 I_0 的乘积成正比，而与受激喇曼散射谱线宽度 $\Delta\gamma$ 成反比。

基于 SRS 机制，一个入射泵浦光子通过光纤的非线性散射转移部分能量，产生另一个低频光子，称为斯托克斯频移光，而剩余的能量被介质以分子振动（光学声子）的形式吸收，完成振动态之间的跃迁。斯托克斯频移 $\gamma_R = \gamma_P - \gamma_S$ 由分子振动能级决定，其值决定了 SRS 的频率范围，对非晶态石英光纤，其分子振动能级融合在一起，形成了一条能带，因而可在较宽的频差 $\gamma_P - \gamma_S$ 范围（40THz）内通过 SRS 实现信号光的放大，光增益系数 $g = g_R I_P$ ， I_P 为泵浦光强度，由泵浦功率 P_p 决定， g_R 为喇曼增益系数。

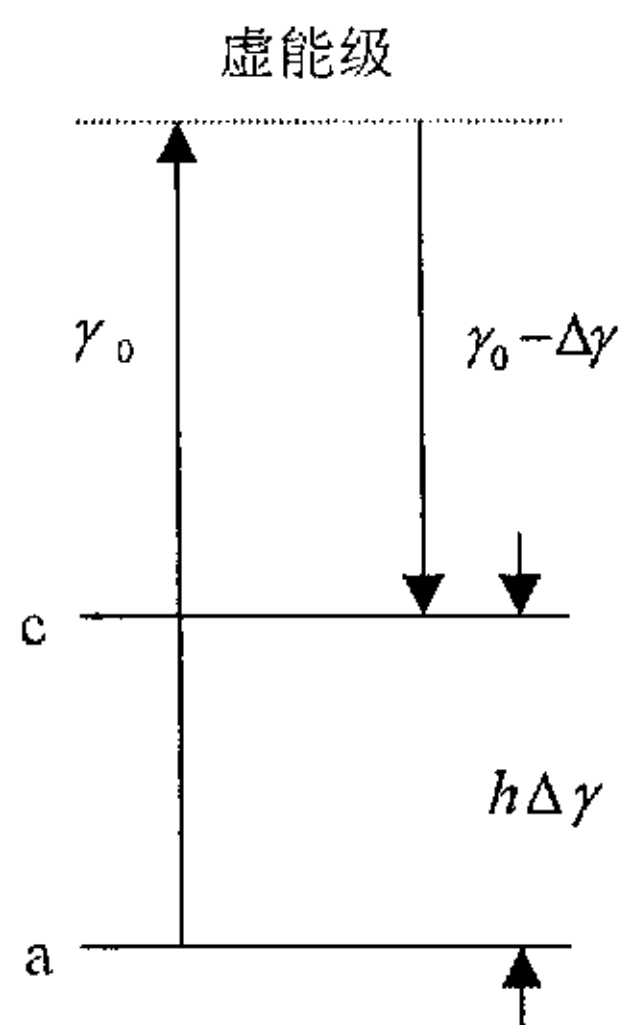


图 2-2 下频移喇曼散射

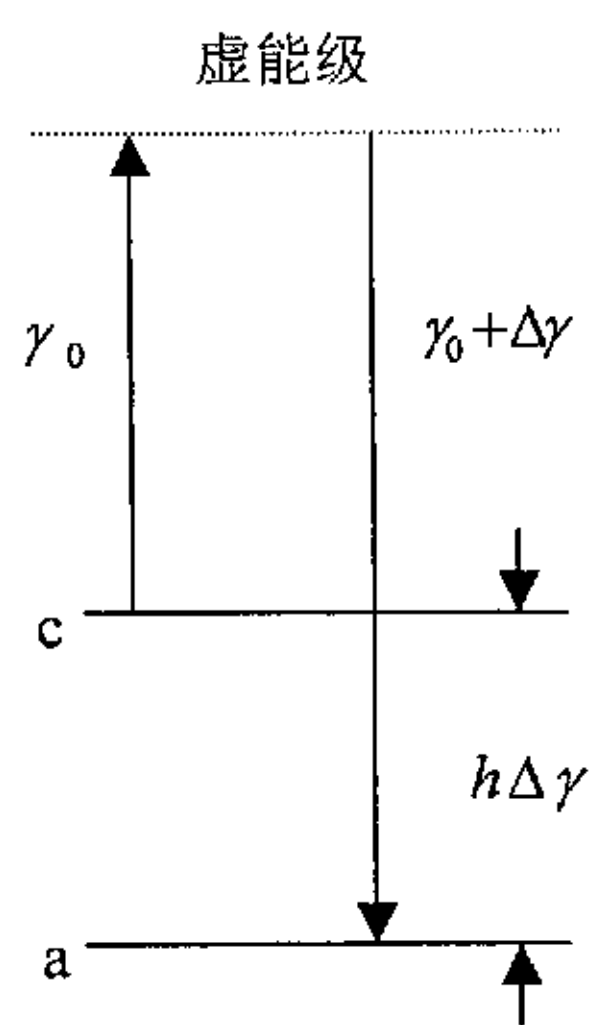


图 2-3 上频移喇曼散射

在 FRA 放大过程中，信号光通过 SRS 增益从泵浦光得到能量而被放大，同时又被光纤吸收而衰减；而泵浦光通过 SRS 过程将能量转移给信号光而衰减，同时亦被光纤吸收而衰减，这两种过程同时存在。在连续波情况下，泵浦波和斯托克斯波的相互作用过程，可用下列耦合方程来分析^[81]：

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{g_R}{a_p} P_p P_s - \alpha_s P_s \quad (2-3)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = \frac{\gamma_p g_R}{\gamma_s a_s} P_p P_s - \alpha_p P_p \quad (2-4)$$

式中， a_p 和 a_s 分别为泵浦光和信号光的横截面， α_p 和 α_s 分别为泵浦波长和信号波长处的光纤损耗， γ_p 和 γ_s 分别为泵浦光和信号光频率， P_p 和 P_s 分别为泵浦光和信号光功率。

2.2 光纤喇曼放大器理论模型

为了对光纤喇曼放大器及其系统进行理论仿真研究，我们根据光纤喇曼放大器原理结合光信号在放大器中的传输特性，建立了如图 2-4 所示的理论模型。该理论模型模拟了信号光和泵浦光在反向泵浦的 FRA 中的传输过程，其中考虑了后向瑞利散射 (BRS)，受激喇曼散射 (SRS) 和自发喇曼散射 (STRS)，Kerr 非线性效应，自相位调制 (SPM)，交叉相位调制 (XPM) 和色散效应。在这样一个复杂的传输过程中，信号光和泵浦光受到以上各种效应的影响：后向瑞利散射将导致部分信号光和泵浦光在光纤中的多次反射；受激喇曼散射将导致能量在泵浦光功率和信号光功率之间转换；放大后的自发喇曼散射光也将发生后向瑞利散射。数字解法对于这样的两点边界条件很困难，因为通常分布傅立叶方法可以解决光信号从左至右的传输过程，但是必须知道向后传输的光信号在输入端的信息，然而这些信息通常在这种情况下是未知的。

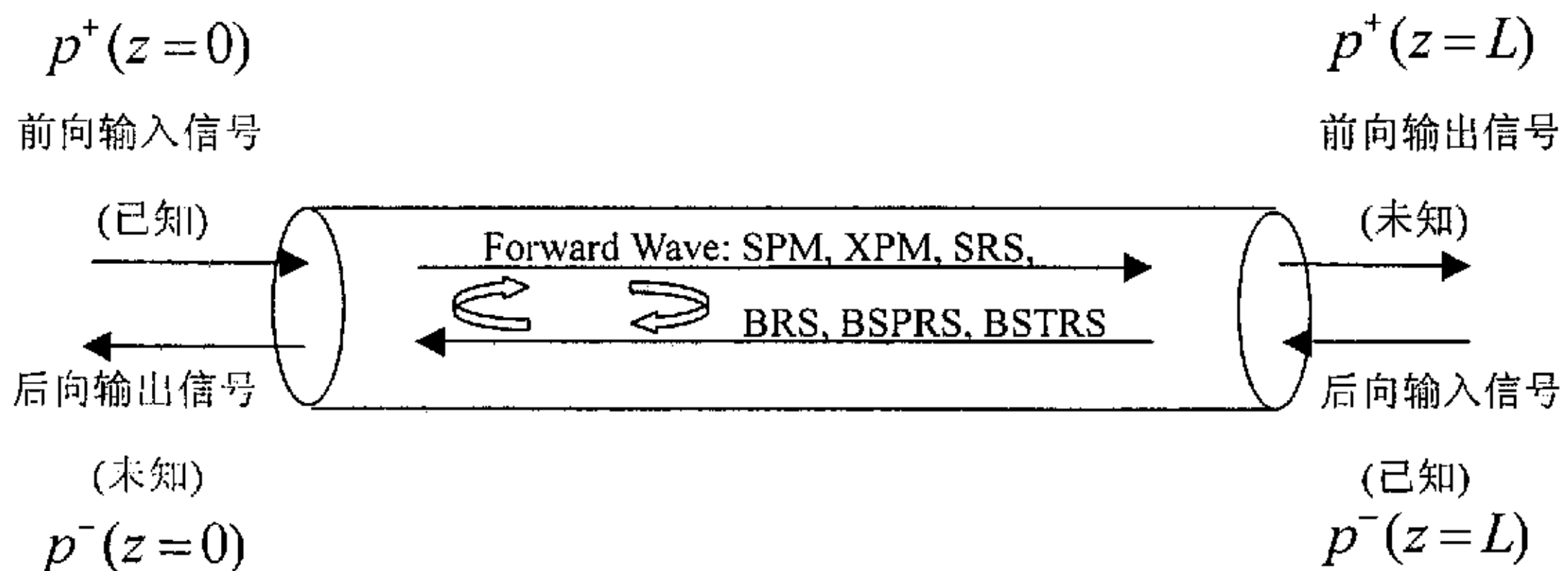


图 2-4 FRA 理论模型

通常用迭代的方法来解决这类问题。首先我们可以假定一个合理的 $p^-(z)$ 值，然后利用边界条件和假设条件可以解出 $p^+(z)$ ，由于 $p^-(z)$ 不是精确值，因此解出的 $p^+(z)$ 只是个近似值。通过 $p^+(z)$ 又可以计算出 $p^-(z)$ 的值，此时完成一个迭代过程。每次迭代时检查是否收敛，一旦达到迭代精度或是完成最大迭代次数，迭代结束。

在两步数字计算分析中，功率分析和场分析都被应用。

1) 功率分析^[81]：

$$\frac{dP_s^-(z, f_i)}{dz} = -\alpha(f_i)P_s^-(z, f_i) + \eta(f_i)P_s^-(z, f_i) + \sum_{k \neq i} g(f_k, f_i) [P_s^-(z, f_k) + P_n^-(z, f_k) + P_s^+(z, f_k) + P_n^+(z, f_k)] P_s^-(z, f_i) \quad (2-5)$$

$$\frac{dP_s^+(z, f_i)}{dz} = \alpha(f_i)P_s^+(z, f_i) - \eta(f_i)P_s^+(z, f_i) - \sum_{k \neq i} g(f_k, f_i) [P_s^+(z, f_k) + P_n^+(z, f_k) + P_s^-(z, f_k) + P_n^-(z, f_k)] P_s^+(z, f_i) \quad (2-6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_n^-(z, f_i)}{dz} &= -\alpha(f_i)P_n^-(z, f_i) + \eta(f_i)P_n^-(z, f_i) + \sum_{k \neq i} g(f_k, f_i) [P_s^-(z, f_k) + P_n^-(z, f_k) + P_s^+(z, f_k) + P_n^+(z, f_k)] P_n^-(z, f_i) \\ &+ \sum_{k \neq i} g(f_k, f_i) [P_s^-(z, f_k) + P_n^-(z, f_k) + P_s^+(z, f_k) + P_n^+(z, f_k)] W(f_k, f_i) \end{aligned} \quad (2-7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_n^+(z, f_i)}{dz} &= \alpha(f_i)P_n^+(z, f_i) - \eta(f_i)P_n^+(z, f_i) - \sum_{k \neq i} g(f_k, f_i) [P_s^+(z, f_k) + P_n^+(z, f_k) + P_s^-(z, f_k) + P_n^-(z, f_k)] P_n^+(z, f_i) \\ &- \sum_{k \neq i} g(f_k, f_i) [P_s^+(z, f_k) + P_n^+(z, f_k) + P_s^-(z, f_k) + P_n^-(z, f_k)] W(f_k, f_i) \end{aligned} \quad (2-8)$$

式中 $P_s^\pm(z, f_i)$ 表示频率为 f_i 的信号在 z 处的光功率大小，“+”代表前向，“-”代表后向； $P_n^\pm(z, f_i)$ 表示频率为 f_i 的噪声在 z 处的光功率大小，“+”代表前向，“-”代表后向； $\alpha(f_i)$ 为损耗系数，它同时包括了由于自发喇曼散射和瑞利散射引起的光功率损耗。 $\eta(f_i)$ 为瑞利散射系数， $g(f_k, f_i)$ 为喇曼增益系

数, $N(f_k, f_i)$ 为噪声因子, 它考虑了自发喇曼散射谱特性及其与温度的关系, 其表达式如下:

$$N(f_k, f_i) = hf_i \delta f \left[1 + \frac{1}{e^{\frac{h(f_k - f_i)}{kT}} - 1} \right] \quad (2-9)$$

式中 δf 为频率间隔, h 为普朗克常量, k 为波尔兹曼常数, T 为光纤的温度。公式 2-5 至公式 2-8 的右侧前两项分别代表损耗和后向瑞利散射, 第三项代表前后向传输信号和噪声间的喇曼散射。这组方程可以通过迭代法求解, 在迭代过程中二阶 Runge-Kutta 方法被应用。该组方程的边界条件由下式给出:

$$\begin{cases} z = 0 : P_s^+(f_i), P_n^+(f_i) \\ z = L : P_s^-(f_i), P_n^-(f_i) \end{cases} \quad (2-10)$$

2) 模场分析^[81]:

对于频率为 f_i 的前向传输信号满足以下方程:

$$\frac{\partial}{\partial z} A_i^+(t) = -\frac{\alpha}{2} A_i^+(t) + \hat{D} A_i^+(t) + \frac{\partial}{\partial z} |_{nl} A_i^+(t) \quad (2-11)$$

其中:

$$\begin{aligned} \frac{1}{-j\gamma_i} \frac{\partial}{\partial z} |_{nl} A_i^+(t) = & (1 - \rho) A_i^+(t) | A_i^+(t) |^2 + \rho A_i^+(t) \int_0^\infty h(\tau) | A_i^+(t - \tau) |^2 d\tau + \\ & 2(1 - \rho) A_i^+(t) \sum_{k \neq i} | A_k^+(t) |^2 + \rho A_i^+(t) \int_0^\infty h(\tau) \sum_{k \neq i} | A_k^+(t - \tau) |^2 d\tau + \\ & \rho \sum_{k \neq i} \int_0^\infty h(\tau) A_k^+(t) A_k^+(t - \tau) A_i^+(t - \tau) e^{2\pi j(f_i - f_k)\tau} d\tau + \\ & \rho \sum_{k \neq i} \int_0^\infty h(\tau) [P_s^+(f_k) + P_s^-(f_k) + P_n^+(f_k) + P_n^-(f_k)] A_i^+(t - \tau) e^{2\pi j(f_i - f_k)\tau} d\tau \end{aligned} \quad (2-12)$$

通过对以上两式进行数字求解, 即可对光纤喇曼放大器进行模场分析。为

了对 FRA 进行数字求解，我们对喇曼增益谱进行了拟合，得到拟合曲线为：

$$g(f_k, f_i) = 2\rho\gamma_i \text{Im}[H(f_k - f_i)] \quad (2-13)$$

其中：

$$\gamma_i = \gamma(f_i) = \frac{2\pi n_2 f_i}{cA_{eff}} \quad (2-14)$$

为衡量 Kerr 非线性效应大小的物理量，它可以通过非线性系数 n_2 和有效模场面积 A_{eff} 计算得出。 $\text{Im}[H(f)]$ 为喇曼时域响应函数 $h(t)$ 付氏变换的虚部。

$$h(t) = \begin{cases} \frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{\tau_1^2 \tau_2^2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \sin\left(\frac{t}{\tau_1}\right) & t > 0 \\ 0 & t \leq 0 \end{cases} \quad (2-15)$$

当 $\rho=0.18$, $\tau_1=12.2fs$, $\tau_2=32fs$ 时，拟合效果达到最佳。

在研究宽带光纤喇曼放大器及其系统时，我们对光纤损耗曲线和色散曲线也进行了拟合，得到的拟合曲线分别为：

$$D(\lambda) = 0.08 \times (\lambda - 1550) + 16 \quad (2-16)$$

$$\alpha(\lambda) = \begin{cases} 8.125 \times 10^{-5} \times (\lambda - 1620)^2 + 0.24 & \lambda > 1620nm \\ 3.61 \times 10^{-5} \times (\lambda - 1550)^2 + 0.2 & 1440nm < \lambda < 1550nm \\ \frac{6.5 \times 10^{11}}{f^4} + 4.2 \times 10^{11} \times e^{\frac{-4.75 \times 10^4}{f}} + 0.07 & 1550nm < \lambda < 1620nm \end{cases} \quad (2-17)$$

2.3 仿真平台——光子设计自动化软件

为了优化光链路的传输性能，设备制造商和系统集成商都需要对系统设计中的因数，如功率范围，光纤非线性效应，温度稳定性，增益谱形和色散管理等进行折衷考虑。同时器件制造商也希望在器件平均价格下降的条件下开发出日趋复杂的多端口的，各种波长范围的多功能器件。这些问题大多可以通过自动化设计软件来解决。正如在电子设计中用到的电子设计自动化（EDA）软件一样，在光纤通信中同样需要开发光子设计自动化（PDA）软件。PDA 软件降低了器件和系统开发的成本，同时缩短了开发周期，是具有重大意义的一个发展领域。可以预见，PDA 对光纤通信的影响会像今天的电路仿真软件对半导体和电子工业的发展一样重要和深远。

光纤通信的巨大带宽决定了在 PDA 软件中需要的采样点数非常之多，从而需要很有效的计算手段。以一个 100 信道 50GHz 信道间隔的 WDM 系统为例，总带宽为 5THz。一方面，为了避免折叠失真，软件模拟的谱宽至少应该是信号谱宽的 3 倍，对复数基带信号表示，取样间隔应该是 66.7fs，这个取样间隔非常之短；另一方面，模拟时间必须足够的长，保证足够多的比特数目，以评价误码率特性参数，并提高频域的仿真精度。假设传输信号的“0”和“1”等概率，忽略码间干扰，高斯近似下至少需要 2000 个比特计算误码率。对每信道 2.5Gb/s 的通信系统，2000 个比特流的持续时间是 800ns。因此，计算一个 100 信道 50GHz 信道间隔的 WDM 系统的传输性能大约需要 1.2×10^7 次采样。因此，PDA 软件中信号表示是否有效，采用的算法是否有效将直接决定该软件的可用性和精确性。

作为光子设计自动化软件的杰出代表，VPITransmissionmaker 是在世界上第一代系统级光子设计自动化软件 BroadNed, POALS, GOLD 和 PTDS 光系统设计软件的基础上经过 10 余年的研发而出现的。该软件采用了灵活多样的信号表达方式，包括单频带信号，多频带信号，参数化信号和噪声信号，并采用了不同的仿真模式（块模式和采样模式），从而可以对光器件、光纤通信系统进行精确有效的仿真。其应用领域包括光发射机的设计，色散管理系统设计，光分插复用器设计，SONET/SDH 环网设计，掺杂光纤放大器设计，宽带光纤喇曼放大器设计，光交叉连接设计，超长距离光纤传输系统设计，接收机设计，光码分多址（OCDMA）系统设计以及模拟光纤通信系统设计等等。同时 VPITransmissionmaker 提供了与 Matlab, C, C++, Python 等的接口以便进行联合仿真，还允许用户自定义模块实现用户自己的功能并融入系统进行仿真。

在 VPITransmissionmaker 的四种信号表示方法中，最为常用的是单频带信

号。在单频带信号表示方法下，所有被调制的光波描述为一个单一、连续的频率带，频带表示整个取样光场的信号，可以包括两个偏振状态。光信号的载频通常取决于光源的发射频率，调制产生的频谱展宽称为基带功率谱。为了计算方便，在单频带中使用其基带变换模型，将载频从基带频谱中抽调。当使用基带频率表示时，频带的带宽必须足够大，以包含所有可能的频率单元，如所有 WDM 信道，四波混频产生的新频率和放大器的 ASE 噪声。使用单频带信号描述的光波信号非常精确，如果模拟带宽足够宽，单频带信号表示自动考虑了光纤中的很多重要效应，如四波混频，受激喇曼散射，色散等。但单频带信号也有一些缺点，特别是当 WDM 信道数目较多和比特率较低时，单频带信号表示需要很大的内存空间和计算时间，例如，用单频带信号表示 ASE 的 10THz 带宽非常困难。

本文对光纤喇曼放大器的仿真研究主要是基于 VPITransmissionmaker 仿真平台的，在该仿真平台上对光纤喇曼放大器和混合光纤放大器的设计、特性及其在波分复用光纤通信系统中的应用进行了仿真研究。

2.4 本章小结

本章首先对光纤喇曼放大器的原理进行了较详细的阐述，在此基础上结合光信号在光纤中的传输特性建立了仿真研究光纤喇曼放大器及其系统的理论模型，通过研究该理论模型，得到了功率分析方程组和模场分析方程，并对喇曼增益谱和光纤损耗曲线及其色散曲线进行了拟合，得到了误差很小的拟合曲线，最后对仿真平台 VPITransmissionmaker 进行了介绍。在接下来的几章中，我们将利用所建立的光纤喇曼放大器理论模型和 VPITransmissionmaker 仿真平台，通过功率分析和模场分析，对基于 FRA 的单信道高速光纤通信系统，S 和 C+L 波段宽带光纤放大器的设计和特性及其光纤通信系统进行详细的仿真研究。

第三章 光纤喇曼放大器在单信道高速光纤通信系统中的应用研究

3.1 研究背景

信道比特率不断提高,从 OC—1 到现在的 OC—192 (10Gb/s),乃至 OC—768 (40Gb/s) 以上,给系统设计提出了巨大的挑战,在低速率情况下并不重要的效应比如非线性效应,偏振模色散 (PMD) 等,在高速情况下都将严重影响系统性能。研究表明,光纤传输系统的色散容限与传输速率的平方成反比,对 2.5G 系统,色散容限为 16000ps,对 10G 系统色散容限为 1000ps,而对 40G 系统色散容限降低为 60ps。色散容限的减小无疑对系统设计造成了巨大的困难,对光放大方案的采用和系统中各种无源器件的选择都有很大的影响。

比特率提高也会导致脉冲峰值功率的提高,从而在光纤中产生非线性效应,单信道系统中最突出的一种非线性效应是自相位调制 (SPM)。色散和自相位调制相互作用对光脉冲在光纤中的传输产生复杂的影响,从而影响系统的性能。EDFA 是一种集总式光放大器,光脉冲经过 EDFA 后光功率将产生跃变。经放大后的光脉冲再在光纤中传输将产生严重的自相位调制效应,给系统造成严重的非线性损伤。为了达到放大光脉冲以延长传输距离,同时尽可能的减小非线性损伤的要求,必须对放大器的放大方式进行改变,即将传统的集总式光放大改为分布式光放大,这样光脉冲经过放大介质时,光功率发生缓慢的增长,光功率始终保持在一个较低的水平上,不致使系统产生非线性损伤^[82~86]。FRA 具有自身固有的全波段可放大特性和利用传输光纤做在线放大的分布式放大优点,因此 FRA 在高速光纤通信系统中比 EDFA 更具优势。根据光纤类型的不同,FRA 可分为基于 DCF 的 FRA 和基于传输光纤的 FRA 两类。两类 FRA 均在光纤通信系统中有着广泛的应用。

为了设计高速光纤通信系统,需要对包括色散补偿方案,光放大器,光收发机,光纤特性等在内的多方面因素综合考虑,从而给出系统的优化方案。本章在 VPITransmissionmaker 仿真平台上对基于两类 FRA 的单信道 40Gb/s 光纤传输系统进行了仿真研究,并对各自系统进行了优化设计,得到了一些对系统设计有用的结论。

3.2 基于色散补偿光纤的光纤喇曼放大器在单信道高速光纤通信系统中的应用研究

3.2.1 仿真系统模型

本实验所用的仿真系统模型如图 3-1 所示。光纤由从左至右的三段组成，分别是传输光纤 (TF1)，色散补偿光纤 (DCF) 和传输光纤 (TF2)，TF1 和 TF2 除了在长度上不同以外，其余参数均相同。TF2 与环形控制器相连，通过它可控制光波传输距离，在实验中一共循环了 6 圈。两个 FRA 之间的距离为 85km，系统的工作频率为 193.1THz，TF1 和 TF2 的色散系数为 $16 \times 10^{-6} \text{s/m}^2$ ，有效模场面积为 $80 \mu\text{m}^2$ 。FRA 采用后向泵浦以减小噪声，泵浦频率为 206.1THz。在接下来的仿真试验中，我们将研究表 3-1 中所列的各参数对 BER 的影响，在研究某一参数与 BER 的关系时，其余各参数保持不变。

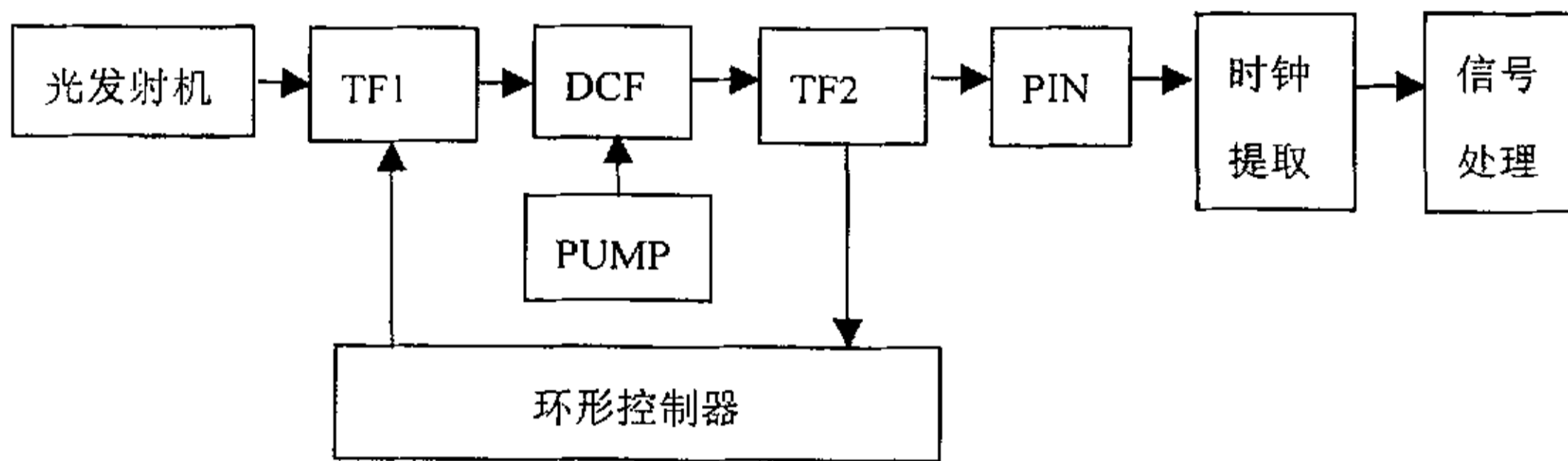


图 3-1 仿真系统模型图

表 3-1 仿真试验中将要研究的参数

比例系数	DCF 非线性系数
泵浦功率	入纤功率
DCF 有效模场面积	信号谱线宽度
DCF 色散系数	DCF 后向瑞利散射系数

3.2.2 比例系数和泵浦功率对系统误码率的影响

TF1 和 TF2 的长度可通过一个比例系数 (a) 来改变。TF1 长度为 $a \times 85\text{km}$, TF2 长度为 $(1-a) \times 85\text{km}$ 。泵浦功率 (P) 和比例系数在影响系统误码率 (BER) 上密切相关, 应该结合讨论。图 3-2 描述了泵浦功率和比例系数变化时, BER 的变化情况。泵浦功率为 0.2W 时, 无论 a 值为多少, BER 都是 1, 此时泵浦功率太小, FRA 提供的增益根本不能抵消线路上的损耗, 信号被淹没在噪声中, 导致 BER 很高。泵浦功率为 0.3W 时, FRA 提供的增益已能抵消线路中的损耗, a 值较小时, TF1 的长度较短, 入射光功率经过这段光纤时还有足够强的光功率, 进入有效模场面积较小的 DCF 时产生非线性效应 (主要是自相位调制) 所致。 a 值较大时 ($0.8-1$), BER 也很大, 因为随着 a 的增加, TF1 长度增加, 导致信号光经过这段光纤后光信噪比变得很低, 整个系统的 BER 增加。 a 为 0.7 时, 整个系统的 BER 达到最小, 这是上述两种效应达到最优时的结果。泵浦光功率继续增加到 0.4W 时, 在 DCF 中的非线性损伤增加, 信号光经过该段光纤产生波形畸变致使 BER 很大且几乎不随 a 变化。

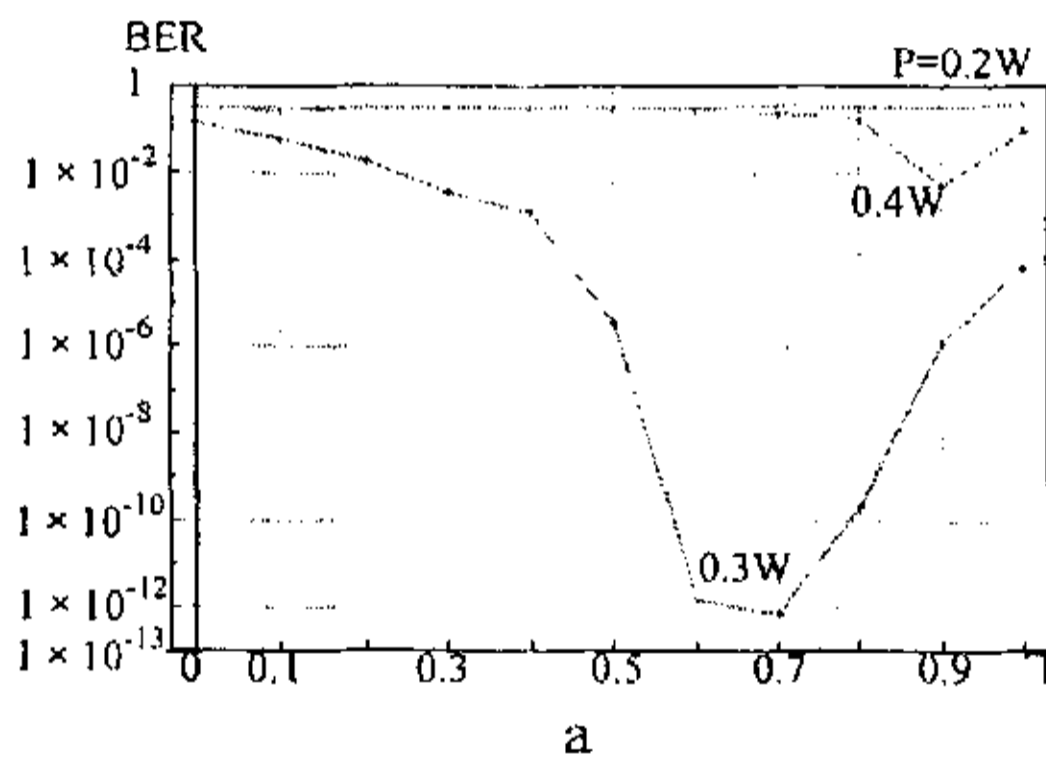


图 3-2 不同泵浦功率下 BER 随 a 的变化曲线

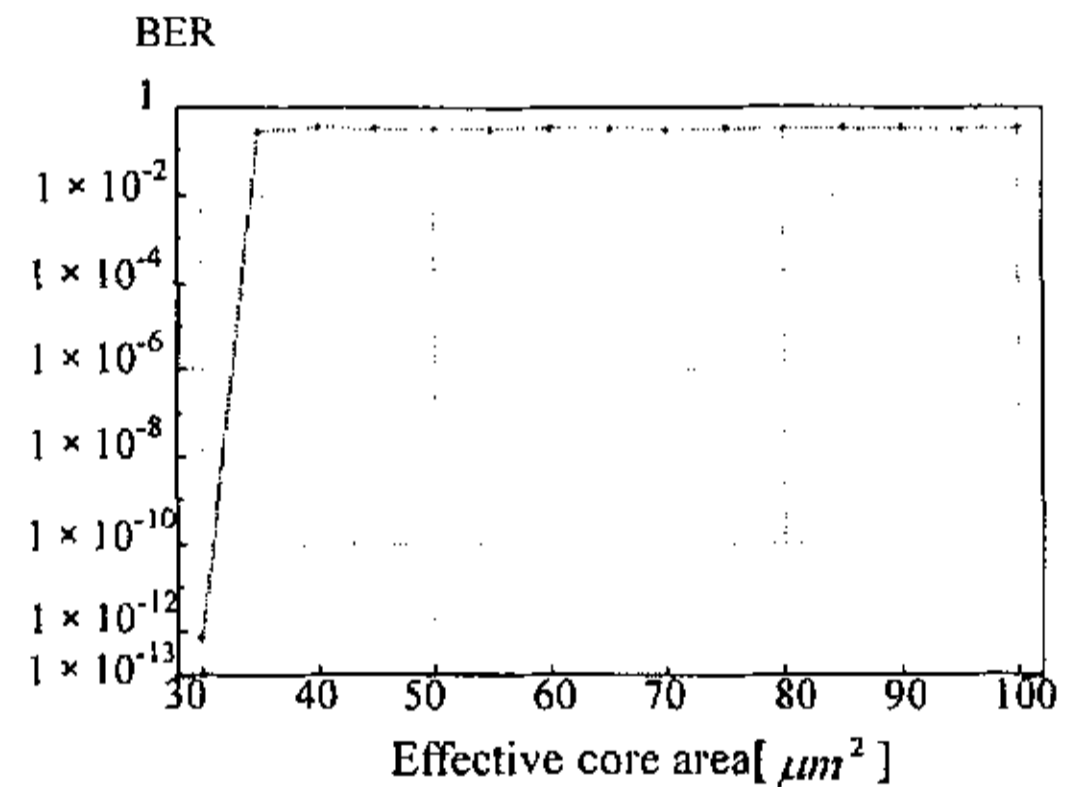


图 3-3 BER 随 DCF 有效模场面积变化曲线

3.2.3 色散补偿光纤有效模场面积对系统误码率的影响

DCF 有效模场面积直接决定喇曼增益大小和 FRA 噪声系数, 也就间接决定了整个系统的 BER, 因此研究 BER 随 DCF 有效模场面积的变化情况很有必要, 它们的变化关系曲线如图 3-3 所示, 当有效模场面积从 $30 \mu\text{m}^2$ 变化到 $40 \mu\text{m}^2$ 时, BER 陡升, 随着有效模场面积继续增加, BER 保持在一个很高的水平上。产生这种现象也是显而易见的, $30 \mu\text{m}^2$ 时已经达到喇曼阈值, 产生喇曼增益,

信号得到放大, BER 保持较小值, 面积再大以后将不足以产生喇曼增益, 因而 BER 很大。

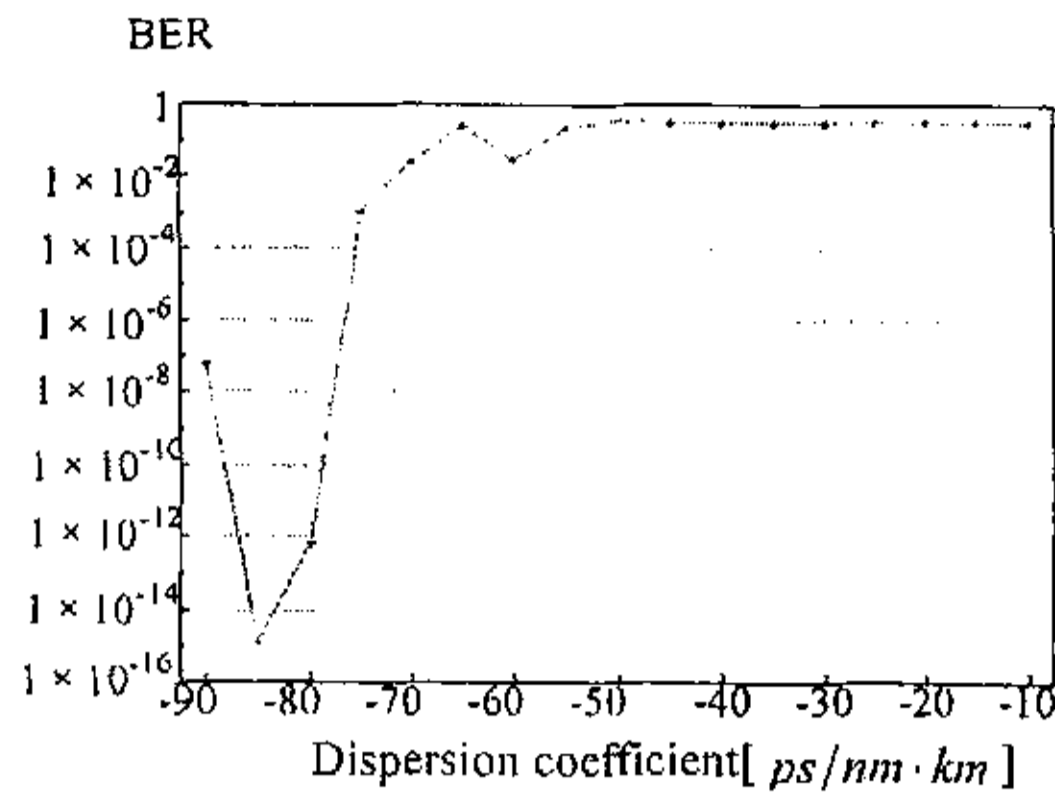


图 3-4 BER 随 DCF 色散系数变化曲线

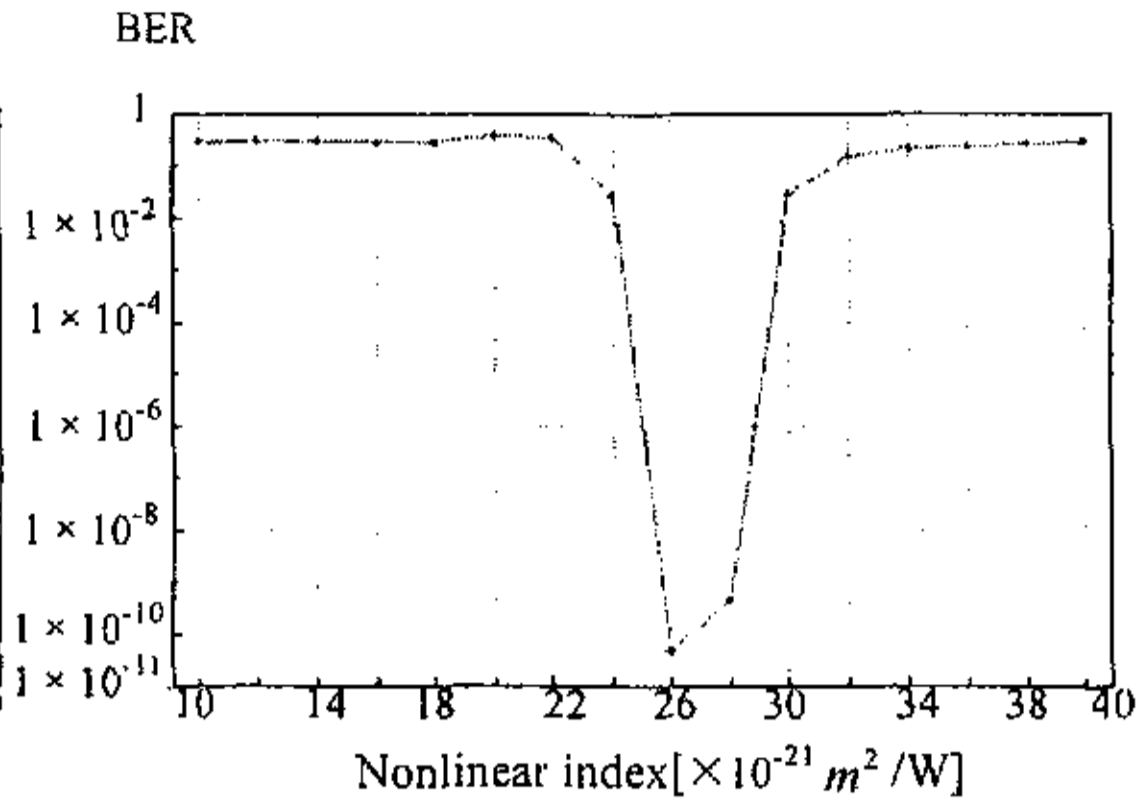


图 3-5 BER 随非线性系数变化曲线

3.2.4 色散补偿光纤色散系数对系统误码率的影响

图 3-4 给出了 BER 随 DCF 色散系数的变化关系曲线。从图中可以看到并不是有了 DCF 后, 系统的色散得到补偿, 系统的 BER 就与色散无关了。与此相反, 系统的 BER 与色散有关, 在 $-85 \times 10^{-6} \text{s/m}^2$ 处, BER 有一最小值, 可以作为系统设计使用。随着色散系数进一步增大, BER 很快保持在一个很高的水平上。色散系数越大, DCF 对系统的色散补偿的效果越弱。可以得出这样一个结论: 在 40Gb/s 系统中, 单单依赖 DCF 进行色散补偿已经不能满足系统需要了, 必须采取新的措施进行色散管理。

3.2.5 色散补偿光纤非线性系数对系统误码率的影响

图 3-5 给出了 BER 随 DCF 非线性系数变化的关系曲线。结果表明非线性系数较小和较大时, BER 都很大, 非线性系数为 $2.6 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$ 时有最小值, 在该值两边 BER 都有较陡的变化。在非线性系数较小时, 受激喇曼效应也较小, 不足以产生足够的增益来抵消线路损耗; 非线性系数较大时, 非线性效应变得很严重, 直接导致 BER 的增加, 非线性系数在 $2.6 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$ 处达到最佳值。

3.2.6 入纤功率对系统误码率的影响

入纤功率也是影响 BER 的一个很重要的因素, 图 3-6 给出了 BER 随入纤功率变化的关系曲线。入纤功率较小时, 信号光通过 TF1 进入 FRA 时光信噪比

已经变得很小，导致 BER 很大。入纤功率很大时，引起严重的非线性效应，导致 BER 升高。在入纤功率为 8mW 时，信号进入 FRA 之前有较大的光信噪比，同时又不至于引起太强的非线性效应，整个系统的 BER 达到最小。

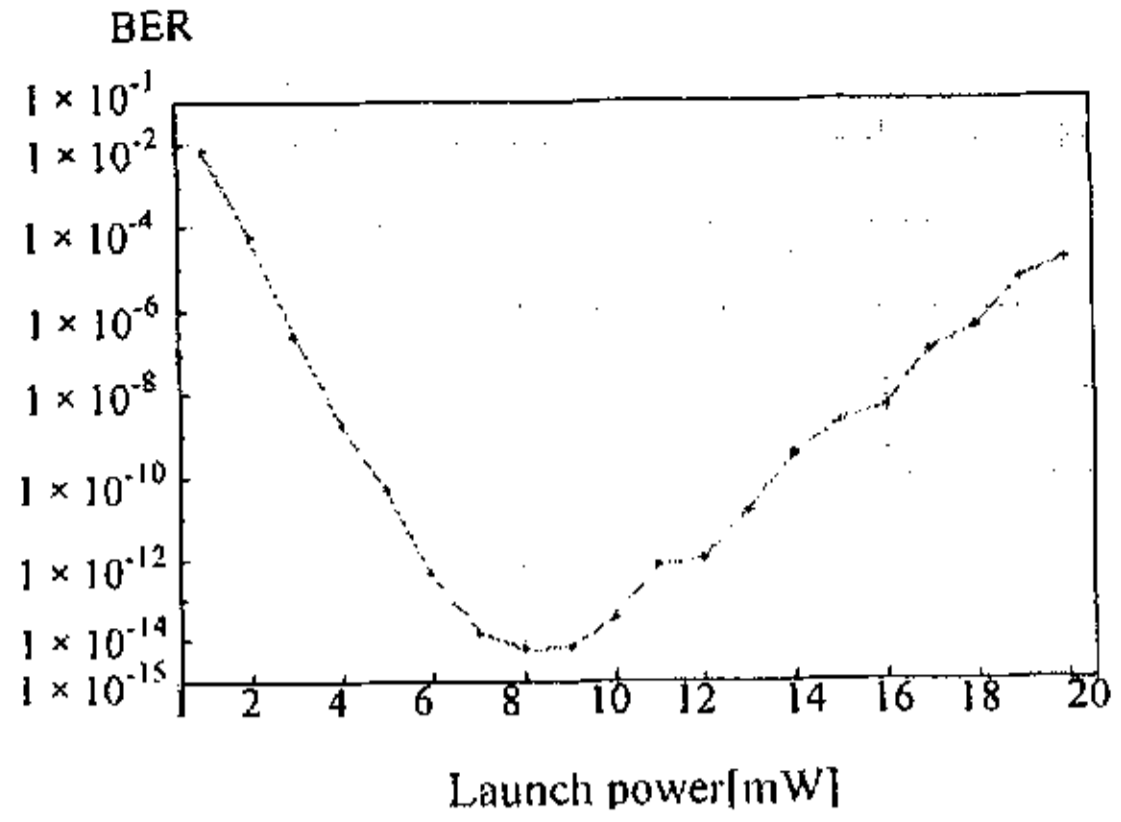


图 3-6 BER 随入纤功率变化曲线

我们对其它有可能影响 BER 的因素也进行了仿真研究，结果表明信号谱线宽度在 5MHz 至 20MHz 之间变化时，BER 几乎不随之变化；DCF

后向瑞利散射系数在 $1 \times 10^{-8} 1/m$ 至 $20 \times 10^{-8} 1/m$ 之间变化时，BER 也不随之改变。可以认为这两个因素在各自变化范围内变化时均对 BER 不产生影响。

3.2.7 优化设计

到此为止，我们已经对基于 DCF 的 FRA 在 40Gb/s 系统中的应用进行了研究，并且可以根据以上的研究对这样一个光纤传输系统进行优化。优化后的系统部分参数如表 3-2 所示。光信号经过这样一个传输系统传输 606km 后，接收端的 BER 为 3.2×10^{-14} ，光功率达到 $4 \mu W$ 。

表 3-2 基于 DCF 的 FRA 的系统优化参数表

信号光频率	193.1THz	入纤功率	8mW
信号谱线宽度	12MHz	TF1 长度	59.5km
TF2 长度	25.5km	DCF 长度	16km
FRA 有效模场面积	$30 \mu m^2$	非线性系数	$2.6 \times 10^{-20} m^2/W$
DCF 色散系数	$-85 \times 10^{-6} s/m^2$	泵浦功率	0.3W
DCF 后向瑞利散射系数	$6 \times 10^{-8} 1/m$		

3.3 基于传输光纤的光纤喇曼放大器在单信道高速光纤通信系统中的应用研究

3.3.1 仿真系统模型

该仿真系统模型图与前述仿真实验的模型图类似，如图 3-7 所示。此时从左至右的三段光纤分别为传输光纤 (TF1)，传输光纤 (TF2) 和 DCF。TF1 与 TF2 的长度之和为 85km，各自的长度通过比例系数 (a) 来改变，TF1 和 TF2 的其它参数均相同。DCF 与环形控制器相连，通过它可控制光波传输距离，此实验中一共循环了 7 圈。系统工作频率为 193.1THz，DCF 的色散系数为 $-90 \times 10^{-6} \text{s/m}^2$ ，有效模场面积为 $30 \mu\text{m}^2$ 。FRA 采用后向泵浦以减小噪声，泵浦频率为 206.1THz。在接下来的仿真试验中，我们将研究表 3-3 中所列的各参数对 BER 的影响，在研究某一参数与 BER 的关系时，其余各参数保持不变。

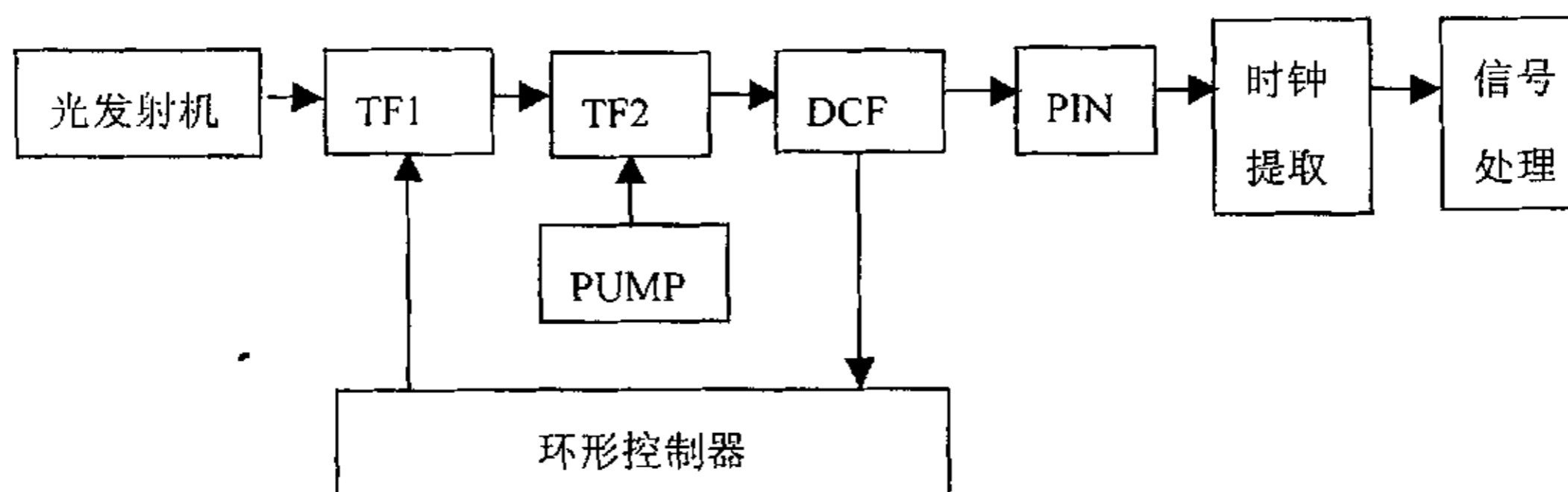


图 3-7 仿真系统模型图

表 3-3 仿真试验中将要研究的参数

比例系数	TF2 非线性系数
泵浦功率	入纤功率
TF2 有效模场面积	信号谱线宽度
TF2 色散系数	TF2 后向瑞利散射系数

3.3.2 比例系数和泵浦功率对系统误码率的影响

泵浦功率和比例系数变化时, BER 的变化情况如图 3-8 所示。泵浦功率为 0.3W 时, 无论 a 值为多少, BER 都接近 1。泵浦功率为 0.4W 和 0.5W 时, 出现相同现象: BER 都是先高后低最后又升高, 只是各自达到最小值时的比例系数数值不同而已。在 0.4W 泵浦功率下, 最小 BER 出现在 a 等于 0.35 处, 而在 0.5W 泵浦功率下, 最小 BER 出现在 a 等于 0.25 处, 两者的最小 BER 相差不大。在下面的仿真实验中, 我们取泵浦功率为 0.4W, 比例系数为 0.35。

3.3.3 传输光纤有效模场面积对系统误码率的影响

BER 随 TF2 有效模场面积的变化关系曲线如图 3-9 所示。该曲线与基于 DCF 的仿真实验所得的曲线不太相同, 小于 $60 \mu m^2$ 大于 $80 \mu m^2$ 时, 系统保持较高的 BER, 而 $70 \mu m^2$ 处有最小 BER。模场面积较小时, 纤芯面积比较小, 容易产生较强的非线性效应, 导致 BER 很高; 模场面积太大, 不容易产生受激喇曼效应, 增益抵消不了线路损耗致使 BER 很高。

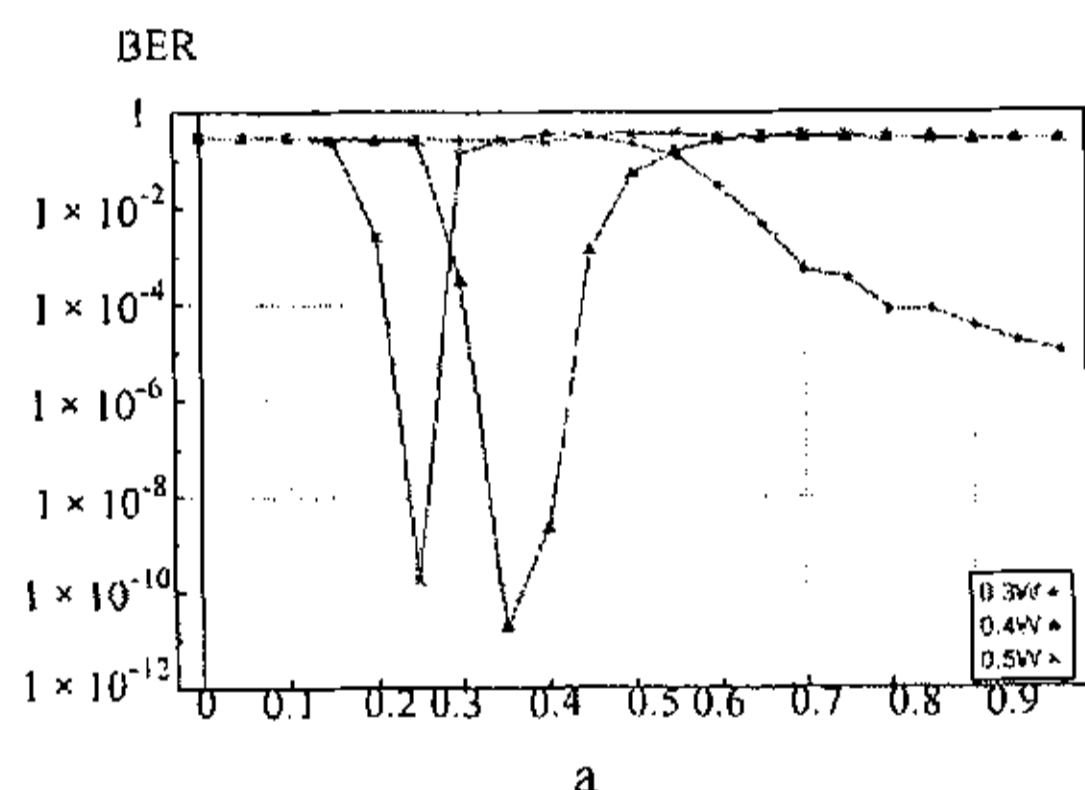


图 3-8 不同泵浦功率下 BER 随 a 的变化曲线

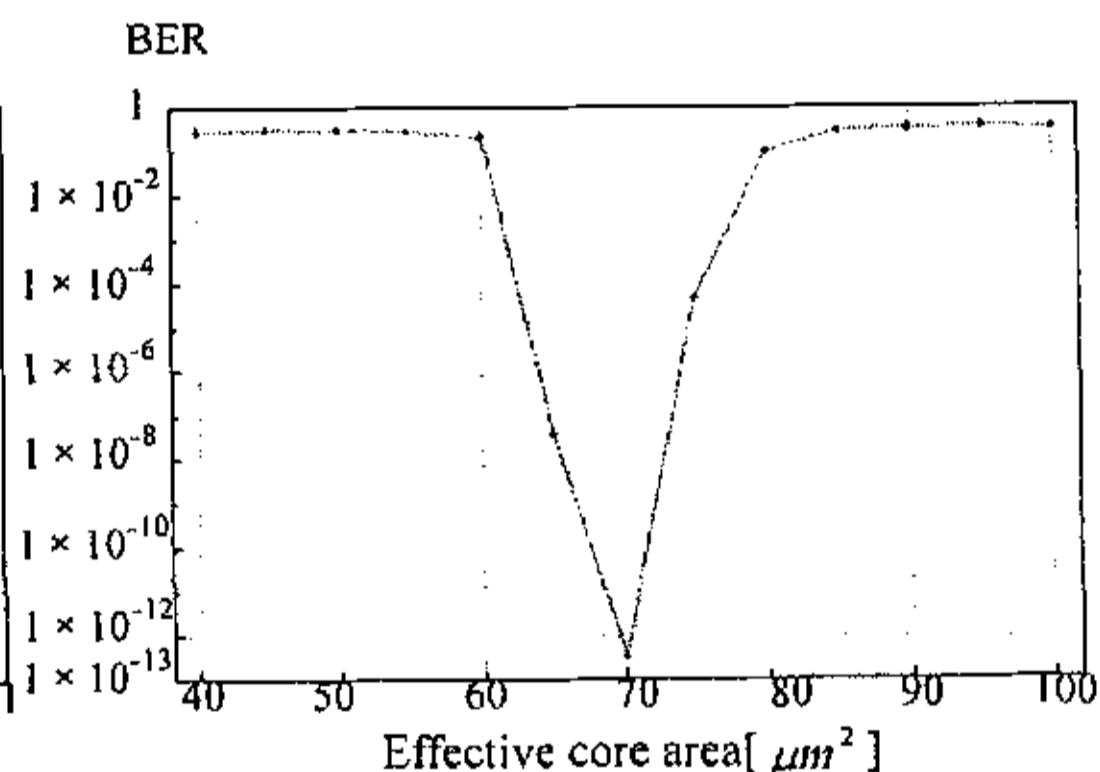


图 3-9 BER 随 TF2 有效模场面积变化曲线

3.3.4 传输光纤色散系数对系统误码率的影响

如果 DCF 能有效的补偿线路色散, BER 应该和色散系数无关。但是仿真结果却与这样的假设完全不同。图 3-10 显示了 BER 随 TF2 色散系数变化的关系曲线。 $12 \times 10^{-6} s/m^2$ 处系统的 BER 达到最小, 色散小于 $10 \times 10^{-6} s/m^2$ 和大于 $20 \times 10^{-6} s/m^2$ 区域内, BER 保持很高的值。这又一次表明单单只依靠 DCF 来进行色散补偿在 40Gb/s 系统中确实已经不能适用了。

入纤功率，非线性系数，后向瑞利散射系数以及线宽等对 BER 的影响与基于 DCF 的 FRA 的变化关系曲线很相似，在非线性系数为 $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ，入纤功率为 6mW 时 BER 达到最小值，后向瑞利散射系数以及线宽在各自范围内变化时对 BER 影响都不大。

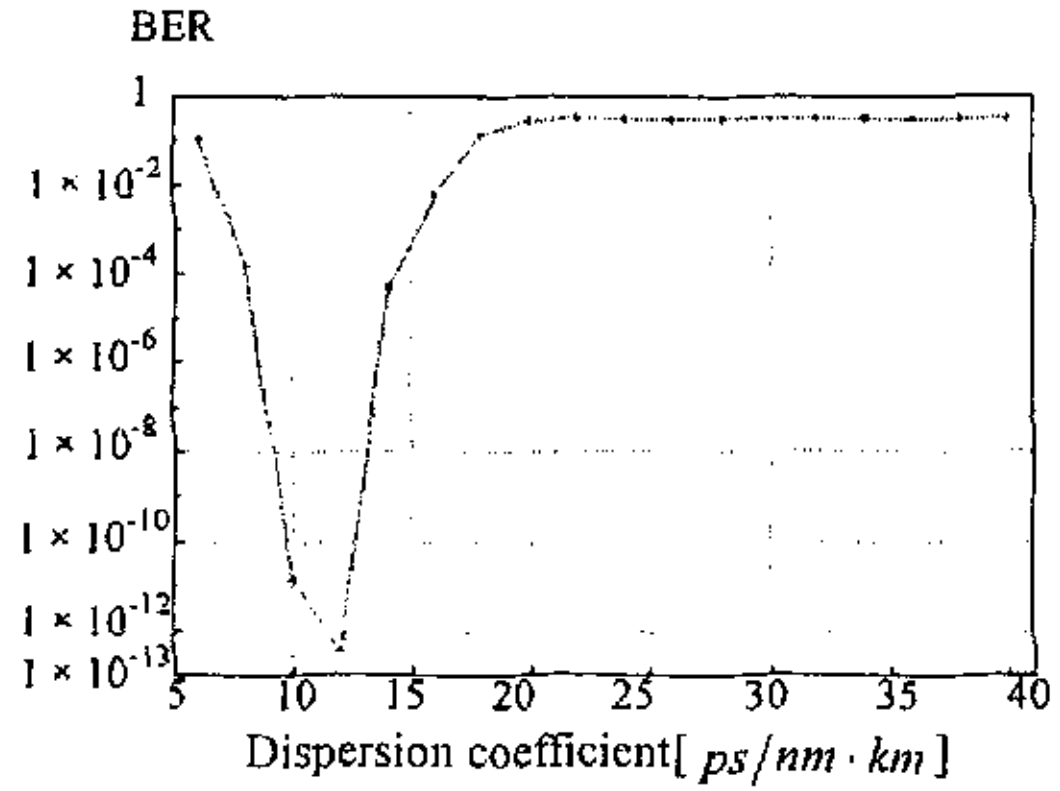


图 3-10 BER 随 TF2 色散系数变化曲线

3.3.5 优化设计

根据以上的研究，经过优化后的系统的一些主要参数如表 3-4 所示。光信号经过这样一个传输系统传输 675km 后，接收端的 BER 为 4.4×10^{-12} ，光功率达到 $3.5 \mu\text{W}$ 。

表 3-4 基于传输光纤的 FRA 的系统优化参数表

信号光频率	193.1THz	DCF 长度	11.33km
信号谱线宽度	12MHz	TF2 长度	29.75km
入纤功率	6mW	泵浦功率	0.4W
TF1 长度	55.25km	非线性系数	$2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$
TF2 有效模场面积	$70 \mu\text{m}^2$	TF2 色散系数	$12 \times 10^{-6} \text{ s}/\text{m}^2$
TF2 后向瑞利散射系数	$6 \times 10^{-8} \text{ 1/m}$		

3.4 两类光纤喇曼放大器及其系统应用的比较

我们已对两类 FRA 在单信道 40Gb/s 光纤传输系统中的应用进行了详细的研究。通过以上仿真，可以看出两类 FRA 及其系统各有优缺点：基于 DCF 的 FRA 有效模场面积较小，具有较高的泵浦效率，在相同情况下所需泵浦功率比基于传输光纤的 FRA 所需的泵浦功率小，其系统传输距离没有基于传输光纤的 FRA 的系统长，但却能保持比基于传输光纤的 FRA 的系统更小的误码率；基于传输光纤的 FRA 因为有效模场面积较大，需要较大的泵浦功率，然而在多加一个 FRA 作为代价的情况下其系统传输距离可以比基于 DCF 的 FRA 的系统长

70km, 但它的误码率要比基于 DCF 的 FRA 的系统高; 基于 DCF 的 FRA 的系统所要求的入纤功率相对较大, 而基于传输光纤的 FRA 的系统所要求的入纤功率则相对较小, 因而在设计实际系统时可以根据具体情况适当选择。

3.5 本章小结

随着信道比特率不断提高, 光脉冲的峰值功率也随之增加, 光纤传输系统中的非线性损伤加重。在单信道系统中, 最具代表性的非线性效应为自相位调制, 它与光纤的色散相互作用决定了光脉冲的传输特性。作为传统光纤通信系统中所用的 EDFA 采用集总式光放大, 光脉冲经过 EDFA 后光功率迅速提升, 使系统产生严重的非线性损伤。为了既能延长传输距离, 又能减小非线性损伤, FRA 被应用到高速光纤通信系统中。FRA 具有自身固有的全波段可放大特性和利用传输光纤做在线放大的分布式放大优点, 光脉冲经过光纤时, 光功率发生缓慢的增长, 光功率始终保持在一个较低的水平上, 系统非线性损伤始终保持在很低的水平上。我们对常用的两类 FRA 及其系统应用做了详细研究, 通过仿真优化设计了两类 40Gb/s 光纤传输系统。光信号在基于 DCF 的 FRA 的系统中经传输 606km 后, 系统保持较低的 BER, 在基于传输光纤的 FRA 的系统中, 可以传输 675km 而保持较小的 BER。在研究过程中还发现现有的依赖 DCF 进行色散补偿的方法在 40Gb/s 光纤传输系统中已经不再适用了, 因此必须寻求更加有效的色散管理方法, 这也是限制无电再生中继距离增加的一个关键的因素。

第四章 宽带光纤喇曼放大器的设计及其在波分复用高速光纤通信系统中的应用研究

4.1 研究背景

上一章讨论了光纤喇曼放大器在单信道高速光纤通信系统中的应用,本章将重点讨论宽带光纤喇曼放大器的设计及其在波分复用高速光纤通信系统中的应用。不断增加的信道比特率和信道数都直接导致了光纤入纤功率的提高,在低速率光纤通信系统和单信道光纤通信系统中不是很明显的非线性效应开始凸现出来。传统的 EDFA 由于是采用集总式放大方式,光功率经过 EDFA 放大后产生跃变,致使系统的非线性损伤加重。光纤喇曼放大器(FRA)作为系统升级扩容的关键器件,在未来的宽带高速光通信网中具有重要作用,它采用分布放大方式,不仅减小了由于入纤功率过大而引起的系统非线性损伤,而且提高了光信噪比(OSNR),增加了光放大器之间的间距,提高了系统的传输距离和性能。随着光纤传输系统传输速率和通信容量的迅速提高,对光纤喇曼放大器的研究开发变得越来越迫切和重要。

随着计算机网络及其它新的数据传输业务的飞速发展,信息量急剧增加,现有的光纤传输系统所能提供的容量很快将被耗尽。如何提高光纤传输系统容量、增加无电再生中继的传输距离,已经成为光纤通信领域研究的热点。解决这个问题的方案有三个:(1)增加每个信道的传输速率;(2)进一步减小信道间距;(3)开发新的通信窗口,增加总的传输带宽。采用第一种方案,例如从 10Gb/s 提升到 40Gb/s 将带来色散补偿问题,这里既有普通的色散又有偏振模式色散(PMD),同时电子器件还存在“电子瓶颈”。采用第二种方案,比如将信道间距从 100GHz 降到 50GHz 或更少将带来诸如四波混频(FWM)等非线性效应,要求系统采取措施控制波长的稳定性。前两种方案实现起来都有一定的难度,人们自然更加关注第三种方案。由于受能级跃迁机制所限,EDFA 一般工作在 1550nm 窗口,不能很好的开发整个光纤低损耗区的带宽资源,而且 EDFA 的光信噪比也不高。光纤喇曼放大器(FRA)由于其自身固有的全波段放大特性和利用传输光纤做在线放大的优点,能很好的开发整个光纤低损耗区的带宽资源,增加总的传输带宽。光纤喇曼放大器能很好的改善整个光纤通信系统的通信容量和系统性能,可以用来实现在整个光纤低损耗区的放大,从而大大提高带宽利用率,适应信息容量的进一步增加。如何设计宽带光纤喇曼放大器来开发整个光纤低损耗窗口已成为整个光纤通信界又一关注的热点^[87-97]。

在本章中先介绍了一种宽带光纤喇曼放大器的快速设计方法,通过该方法

能够迅速的设计出指定波段的宽带光纤喇曼放大器；在此基础上介绍了一种增益控制的方法，通过该方法可以任意地改变宽带 FRA 的增益；接下来对所设计的 S 波段的宽带光纤喇曼放大器特性进行仿真研究，得到泵浦光与信号光，信号光与信号光，泵浦光与泵浦光之间相互作用的一些结论，并对宽带 FRA 的噪声特性进行研究；最后在 VPITransmissionmaker 仿真试验平台上，对基于宽带光纤喇曼放大器的 WDM 高速光纤通信系统进行了较详细地研究，得到了色散补偿光纤的配置、光纤喇曼放大器的色散系数、色散斜率、有效模场面积、非线性系数、后向瑞利散射系数、入纤功率、Bessel 滤波器带宽以及光纤喇曼放大器长度对系统误码率的影响关系，同时对严重影响长距离光纤传输系统性能的后向瑞利散射噪声对光信噪比及误码率的影响也作了较详细地研究。研究结果表明，通过合理设计光纤参数能够实现宽带长距离传输。研究结果对基于光纤喇曼放大器的波分复用光纤传输系统的优化设计具有一定的参考价值。

4.2 一种宽带光纤喇曼放大器的设计

4.2.1 宽带光纤喇曼放大器仿真系统模型

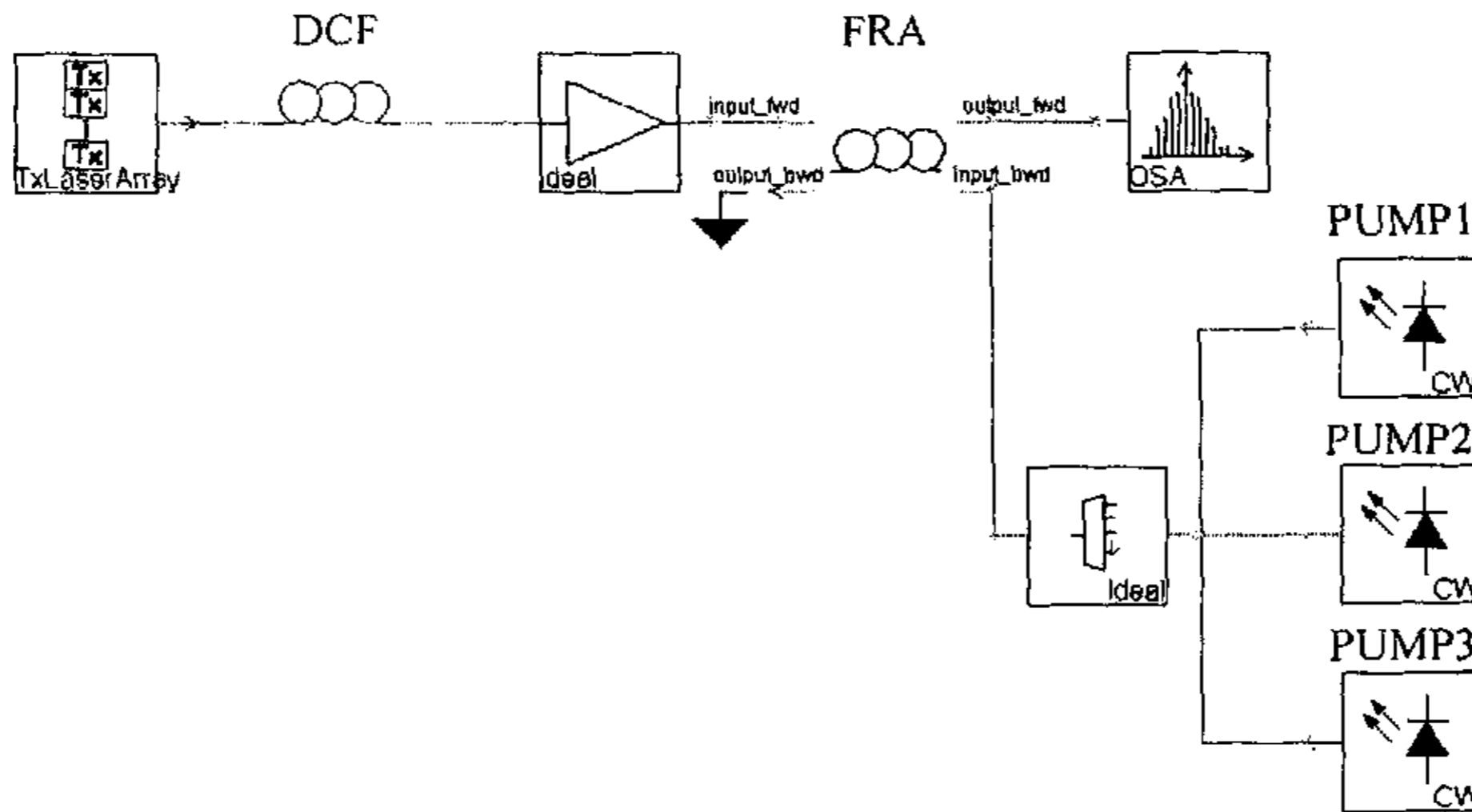


图 4-1 FRA 仿真系统模型图

本实验所采用的 FRA 仿真系统模型如图 4-1 所示。信号源发出 111 路 WDM 信号注入色散补偿光纤 (DCF) 进行预补偿，然后进入一个理想光放大器进行

光功率锁定，输出的光功率为-13dBm，经过 FRA 放大以后，在频谱仪上对输出光信号进行观察。WDM 信号频率范围为 196—207THz，信道间隔为 100GHz，每路信号的速率为 40Gb/s，FRA 的长度为 20km，采用反向泵浦以减小噪声。PUMP1，PUMP2 和 PUMP3 均为泵浦源，其中 PUMP1 的频率最低，PUMP3 最高。

4.2.2 宽带光纤喇曼放大器的设计

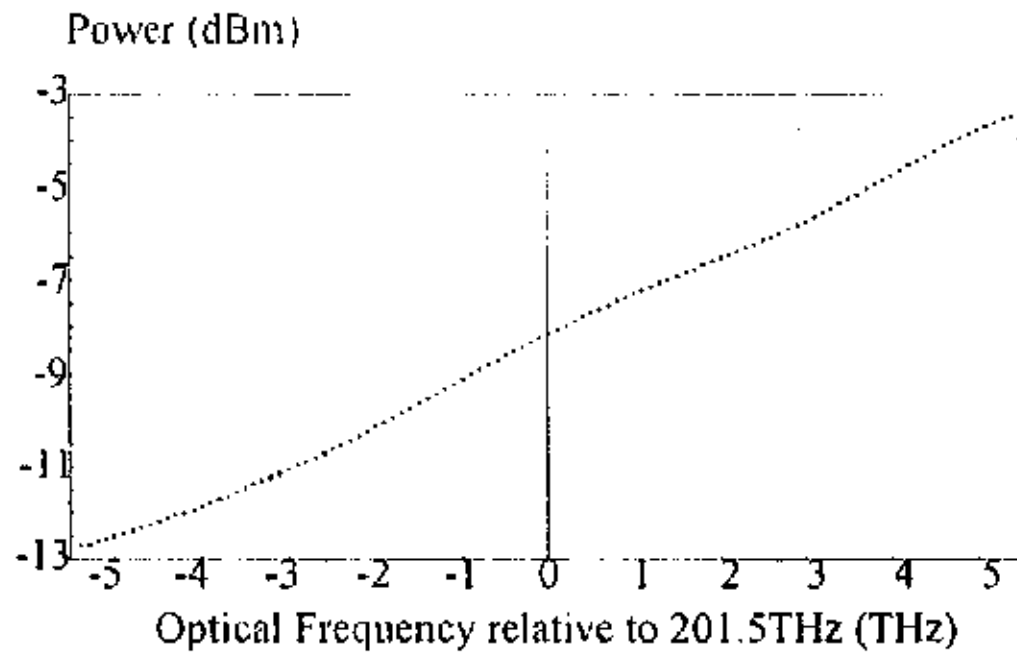


图 4-2 PUMP2 和 PUMP3 共同作用时的输出信号频谱图

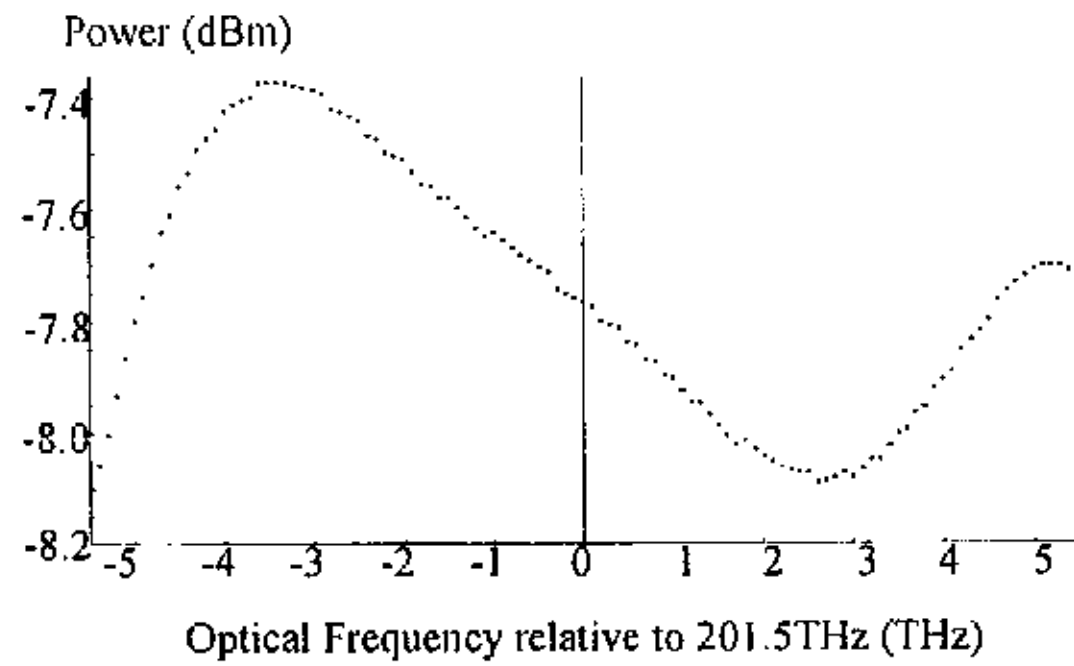


图 4-3 设计成功的 FRA 增益谱

宽带 FRA 设计时需要考虑以下几个方面：(1) 泵浦源之间的相互作用所导致的能量转移。(2) 信号光和泵浦光之间的相互作用。(3) 信号光和信号光之间的相互作用。(4) 光纤损耗随光频率的变化。这几方面的相互作用将直接决定最后输出的信号光功率。为了使 PUMP1 从 PUMP3 处通过 SRS 获得更多能量来控制增益平坦度同时更充分地利用泵浦功率，我们将 PUMP3 的频率设计在 221.5THz，此时最高频信号光正好处于 PUMP3 的喇曼增益峰值处。为了更加简明的阐述宽带 FRA 的设计方法，我们将 PUMP3 的功率设定为 1W。设计时首先去掉 PUMP1，通过精心选择 PUMP2 的泵浦频率和功率，可以使两个边缘的信号光功率的平均值等于中间信号光频处的功率值，如图 4-2 所示。这样 PUMP1 引入以后 PUMP3 会因为泵浦间的 SRS 而将一部分光功率转移至 PUMP1，导致输出功率谱的低频得到抬升，而高频因失去泵浦能量而下降，整个功率谱趋于平坦化。经仔细选择，PUMP2 的频率设定为 215.2THz，功率为 0.097W。然后将 PUMP1 接入到该系统中，调节其泵浦功率和频率就可以得到增益起伏小于 1dB 的输出功率谱，如图 4-3 所示，此时 PUMP1 的泵浦功率为 0.019W，频率为 209.9THz。这样，满足我们要求的 FRA 已经设计成功，该 FRA 的增益值为 5.2dB。从设计成功的 FRA 的 3 个泵浦源的泵浦功率相差很大这一现象可以看出这 3 个泵对 FRA 增益谱的作用不尽相同，因此很有研究的必要。

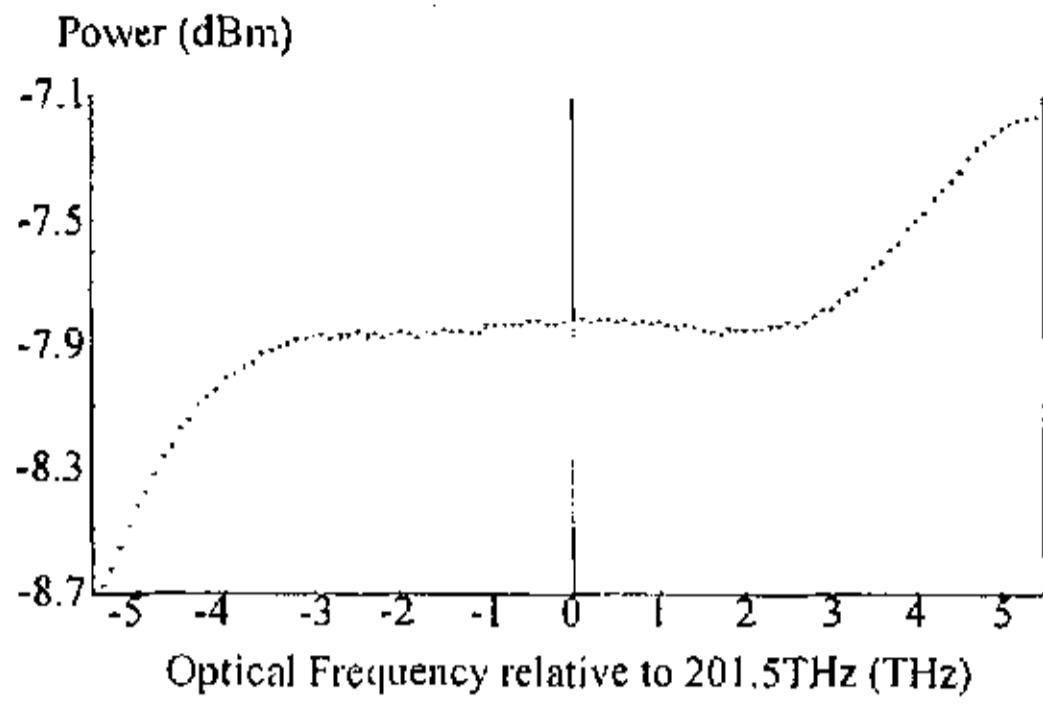


图 4-4 PUMP1 功率变为原来 0.8 倍时的输出信号频谱

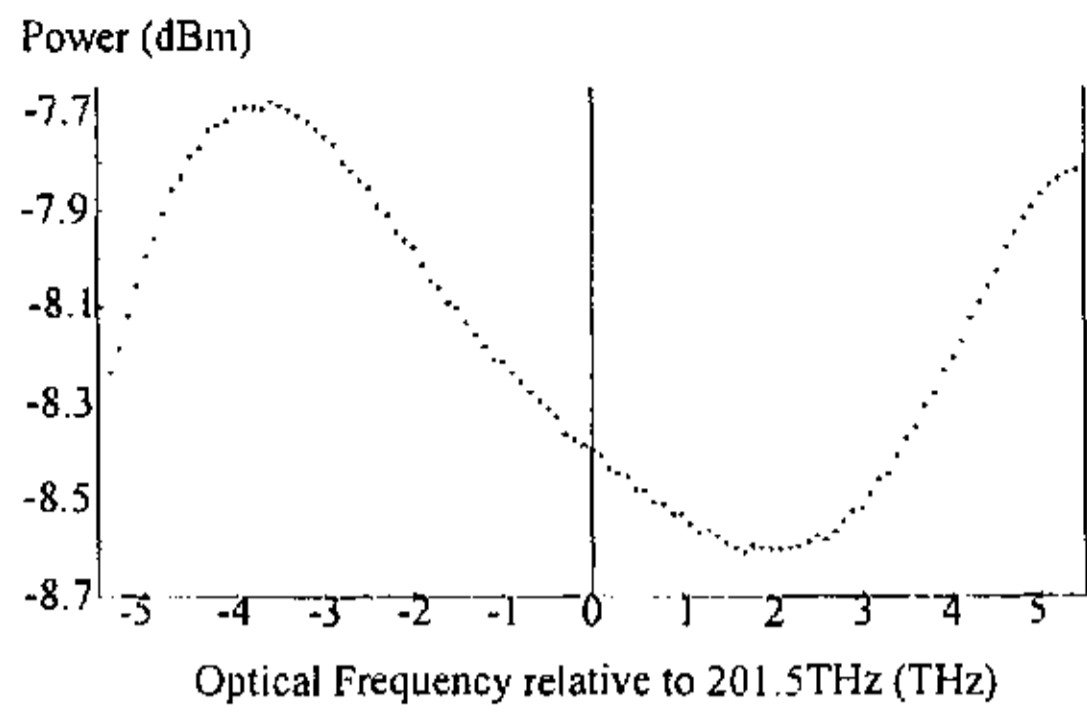


图 4-5 PUMP2 功率变为原来 0.8 倍时的输出信号频谱

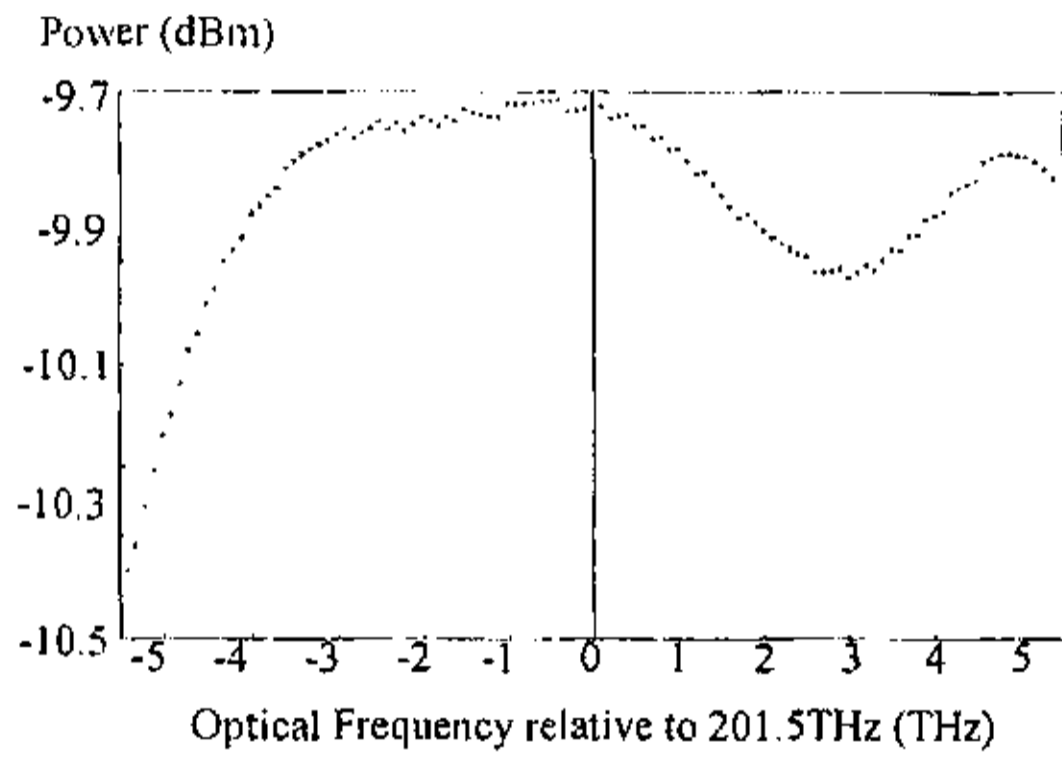


图 4-6 PUMP3 功率变为原来 0.8 倍时的输出信号频谱

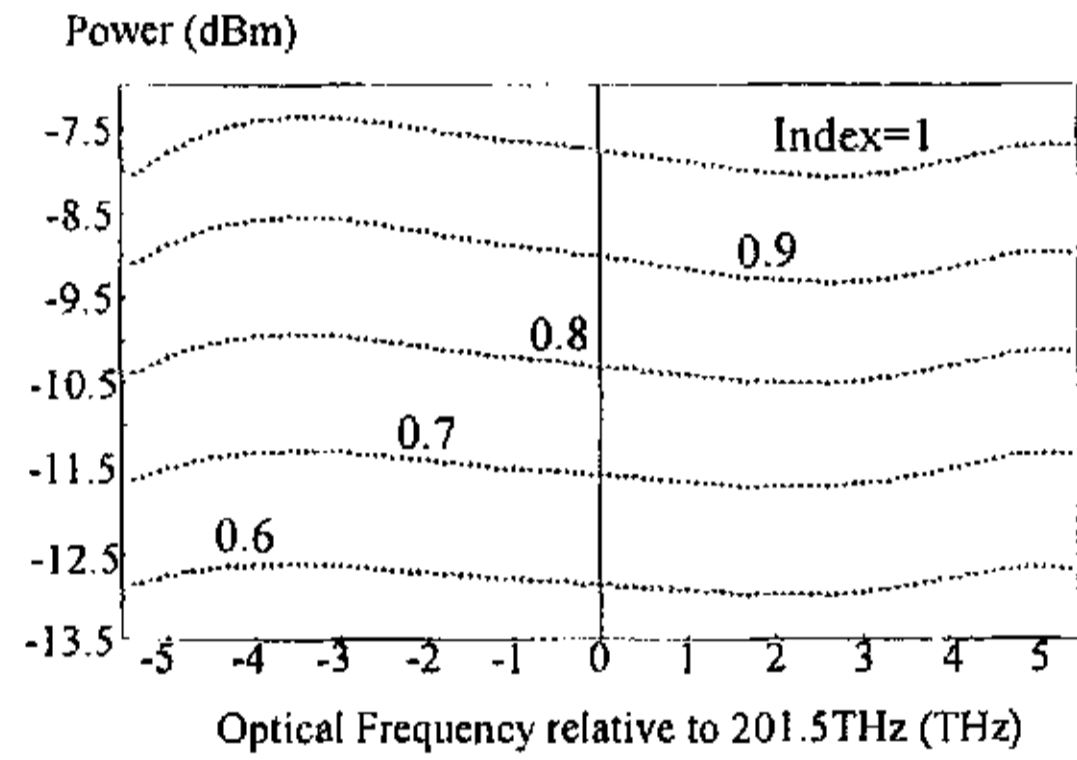


图 4-7 不同泵浦组合下的输出功率谱

表 4-1 各泵浦源对增益谱的影响比较

The pump	P-P (dB)	M (dB)
PUMP1	1.6	-0.05
PUMP2	0.9	-0.35
PUMP3	0.7	-2.15

表 4-2 设计不同增益值的 FRA 参数表

Index	P1 (W)	Out (dBm)
0.6	0.018	-12.8
0.7	0.020	-11.5
0.8	0.021	-10.2
0.9	0.021	-9.1
1.0	0.019	-7.8

我们可以通过分别将 3 个泵功率减小相同倍数后观察输出功率谱的变化方法来研究泵浦源对 FRA 增益谱的作用,先将 PUMP1 的泵浦功率减小为原来的 0.8 倍,其他两个泵的参数不变,输出功率谱如图 4-4 所示,然后将 PUMP2 的泵浦功率减小为原来的 0.8 倍,其他两个泵的参数保持设计值,输出功率谱如图 4-5 所示,最后

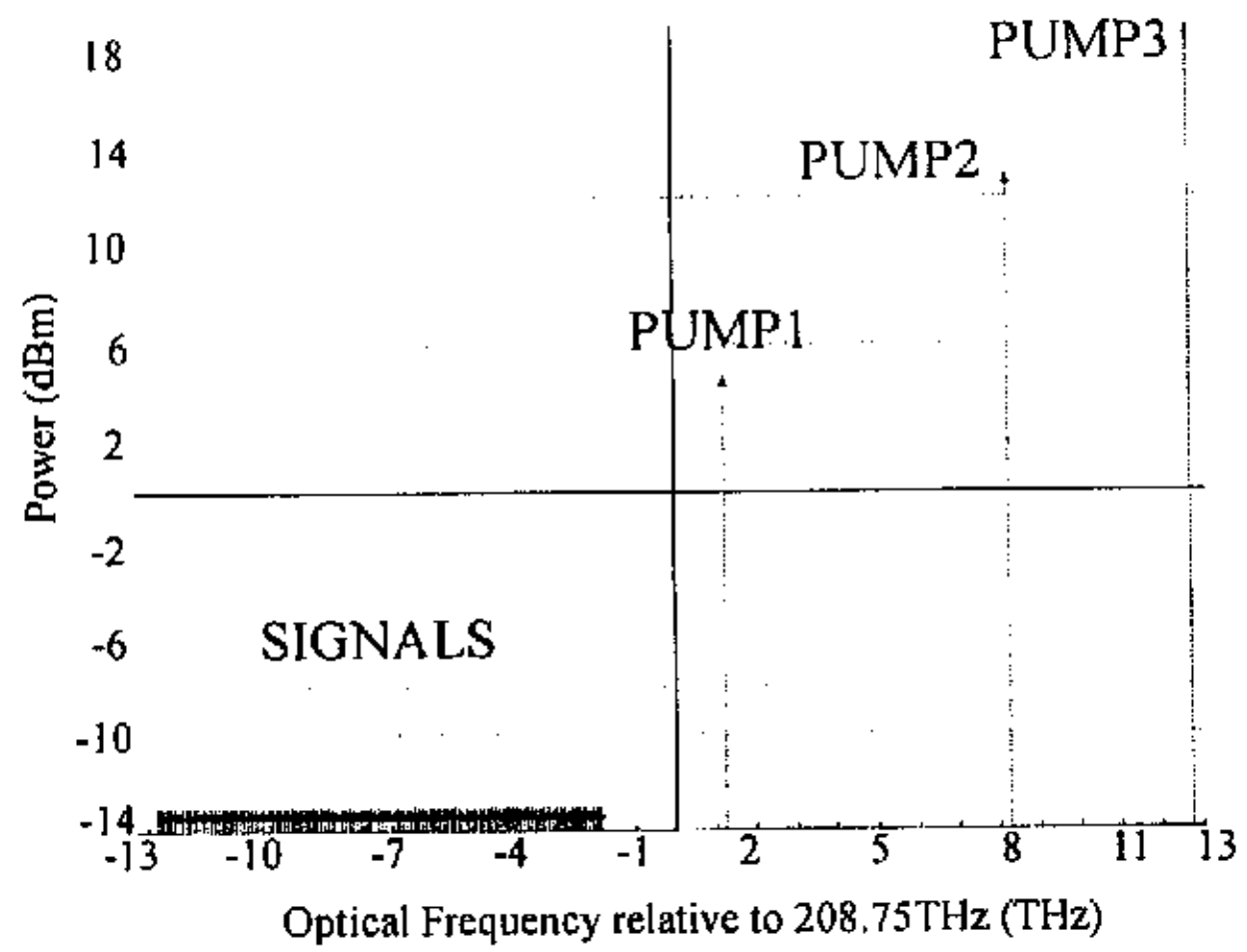


图 4-8 信号光和泵浦光的输入频谱图

将 PUMP3 的泵浦功率减小为原来的 0.8 倍,其他两个泵的参数保持设计值,输出功率谱如图 4-6 所示。比较 3 个图可以看出,虽然 3 个泵功率减小相同倍数,但三者对增益的影响各不相同: PUMP1 对增益曲线的两侧影响较大,对增益值影响较小,这是因为当 PUMP1 功率减小时,PUMP1 和 PUMP3 之间的 SRS 也相应的减小,致使低频信号得不到足够的增益而高频信号则相对增益过甚; PUMP3 影响增益值较大,对增益平坦度影响较小,这主要是 PUMP3 功率有一部分通过泵浦间的 SRS 损耗掉了,当 PUMP3 功率减小时,它转移到别处的功率也减小,使得增益值明显的降低; PUMP2 对增益平坦度和增益值的影响介于两者之间,其喇曼增益峰值位于信号频谱的中部,因此主要影响整个增益曲线的中部的平坦。我们可以通过增益峰峰值 (P-P) 和增益变化值(现在的增益值与原来的增益值之差)(M)来粗略的描述 3 个泵对增益平坦度和增益的影响程

度，如表 4-1 所示。

通过以上的分析研究，我们发现了一种控制增益的简单方法：将 PUMP2 和 PUMP3 的功率降低同等倍数，通过调节 PUMP1 的功率值 (P1) 可以得到增益起伏小于 1dB 的不同增益值。图 4-7 给出了 PUMP2 和 PUMP3 功率降低同等倍数 (Index) 时，经 FRA 放大后的输出功率值 (Out)，各参数如表 4-2 所示。

4.3 宽带光纤喇曼放大器特性研究

为了研究宽带光纤喇曼放大器的增益谱特性，我们用图 4-8 所示的信号光注入宽带 FRA，在输出端接收到光信号如图 4-3 所示。比较两图可以得出以下结论：该光放大器的增益为 5.3dB，增益起伏小于 1dB，增益带宽为 11THz，三个

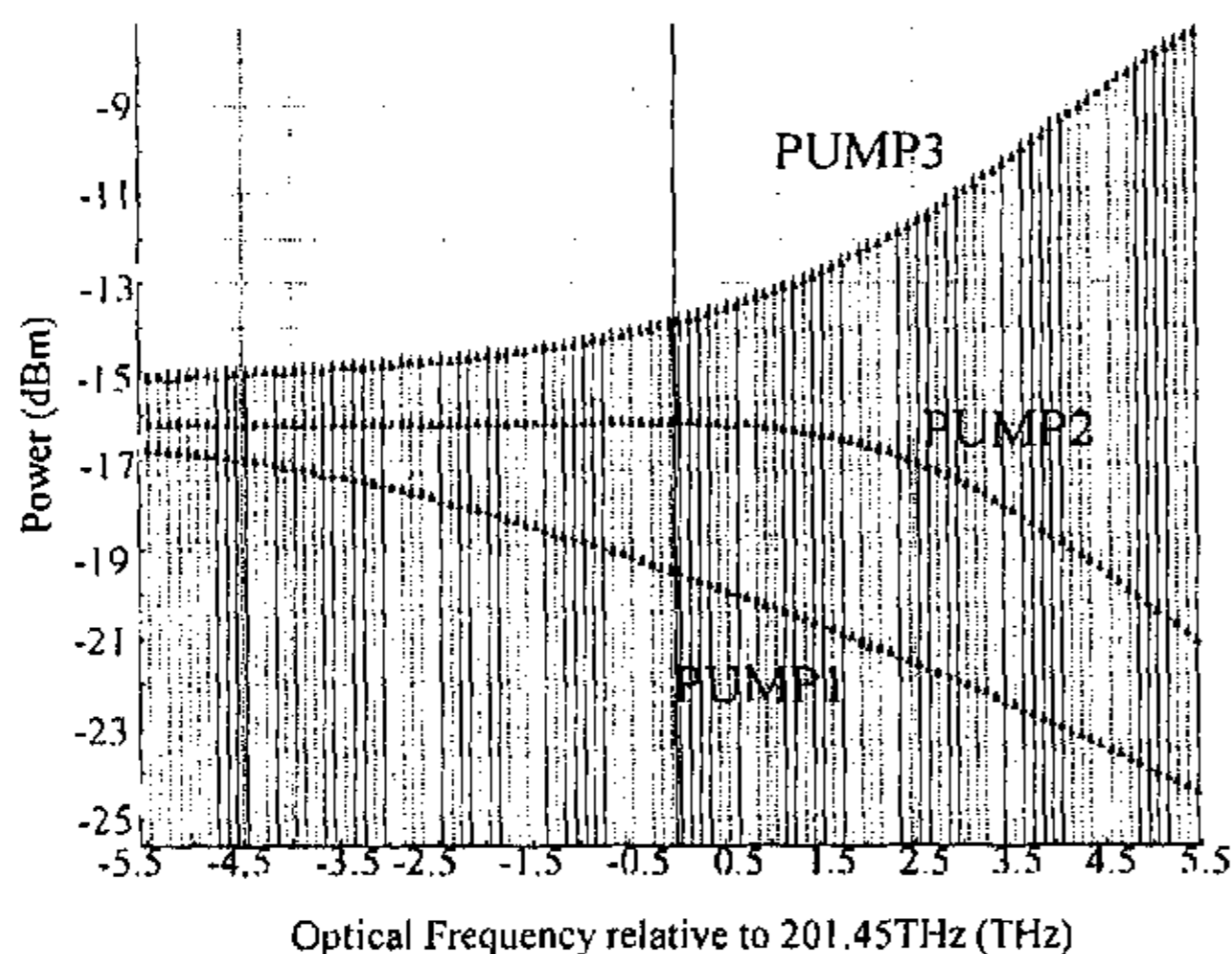


图 4-9 3 个泵浦源分别单独作用时的信号光输出频谱图

泵实现了 S 波段的平坦增益。泵浦频率越高，泵浦功率越大。图 4-9 给出了 3 个泵浦源分别单独作用时的信号光输出频谱图。从图中可以看出，高频泵浦信号在信号的高频部分产生增益，而低频部分没有得到放大；中频泵浦信号对中频和低频信号进行了放大，但是由于泵浦功率较小，增益不足以抵消光纤的损耗，低频泵浦信号只放大了信号的低频部分。究竟泵浦功率怎样通过 SRS 过程将能量转移至信号

光是一个值得研究的问题。在这个能量转移的过程中，信号光与泵浦光，泵浦光与泵浦光以及信号光与信号光的相互作用起着关键性的作用。图 4-10 给出了信号光与泵浦光功率随传输距离的变化关系（为了能够更好的看清信号光随传输距离的变化情况，我们在图中只选取了高频，中频和低频信号光各一束）。从图中可以看出，在这样一个放大过程中，信号光和信号光，信号光和泵浦光，泵浦光和泵浦光之间的相互作用非常复杂。下面我们从能量转移的角度来研究这几个相互作用。对于 PUMP1，在 15-20km 内，由于 PUMP2 比 PUMP1 功率大，因此在此范围内 PUMP2 与 PUMP1 之间有强的 SRS 作用，PUMP1 被放

大,而在 13-20km 内,PUMP3 比 PUMP1 功率大,在此范围内 PUMP3 对 PUMP1 进行放大,在整个传输过程中 PUMP1 对信号进行泵浦,放大信号光;对于 PUMP2,在 7-20km 内,PUMP3 比 PUMP2 功率大,PUMP2 从 PUMP3 那里获得能量而被放大同时它将自己的能量一部分转移到 PUMP1,另一部分转移到信号光上;而 PUMP3 能量分别转移到 PUMP1,PUMP2 以及信号光上;同时高频信号光也会由于 SRS 而转移部分能量到低频信号光上,因此才会出现高频信号光在 0-12km 衰减比低频信号光厉害的现象。这几个过程互相联系,交迭进行。

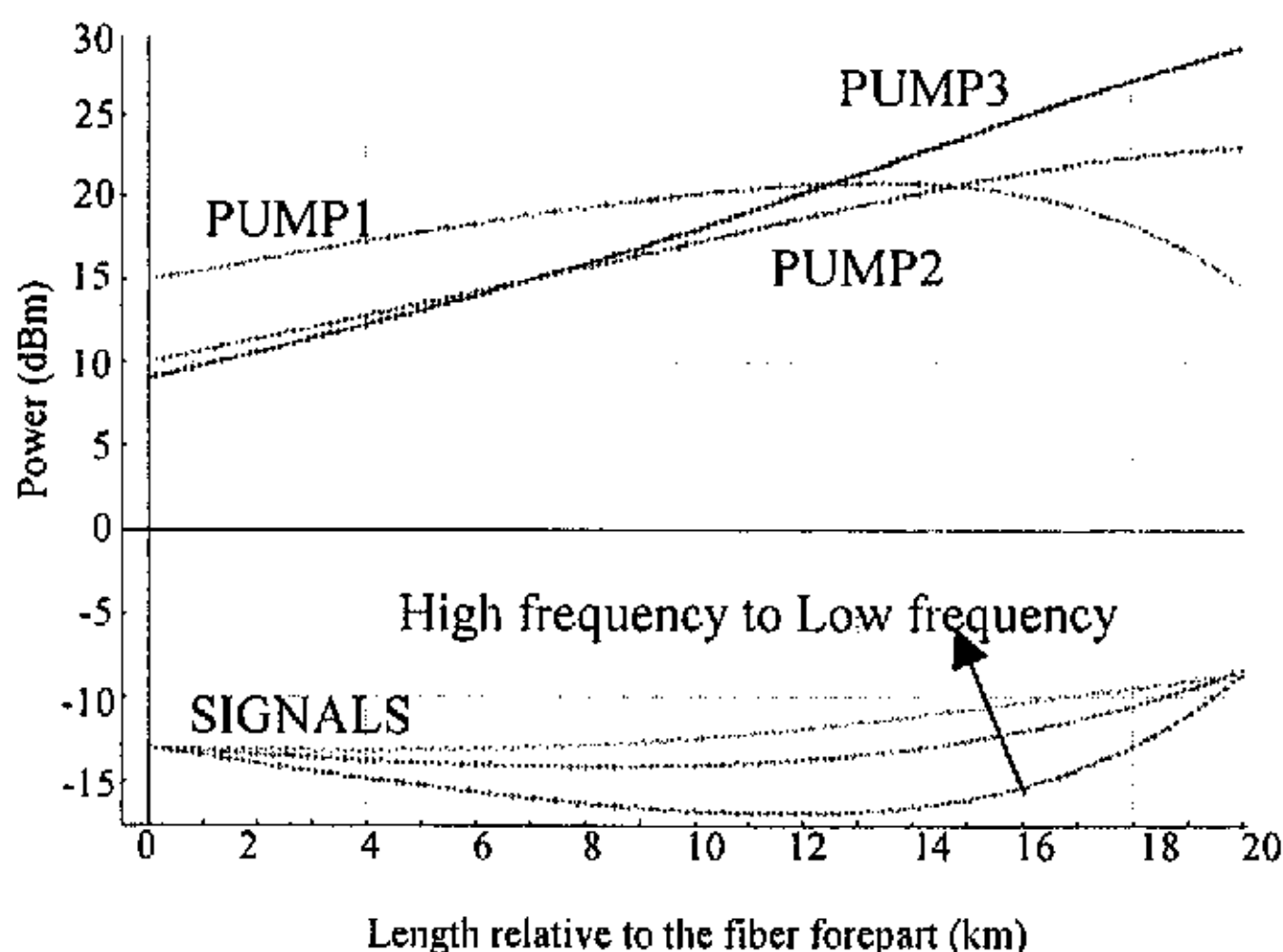


图 4-10 信号光和泵浦光功率随传输距离的变化关系曲线

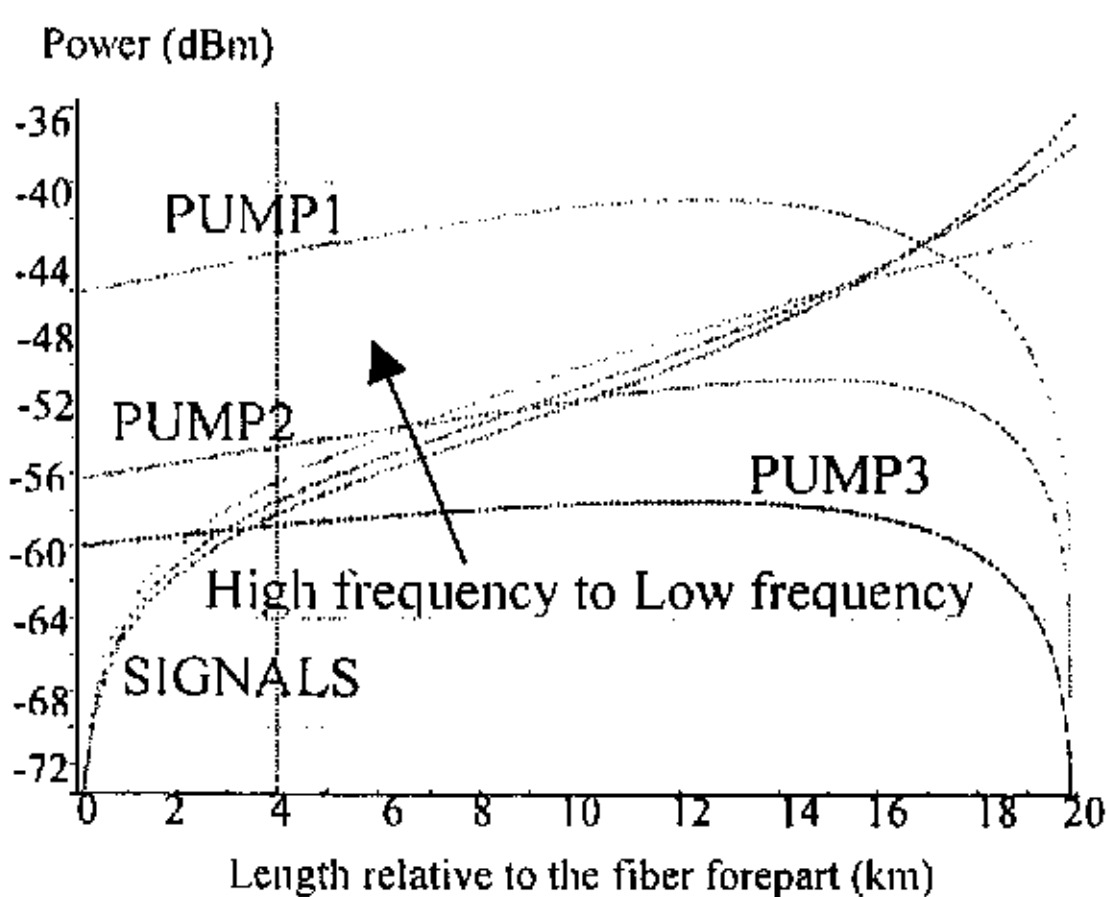


图 4-11 信号和泵浦噪声随传输距离的变化关系

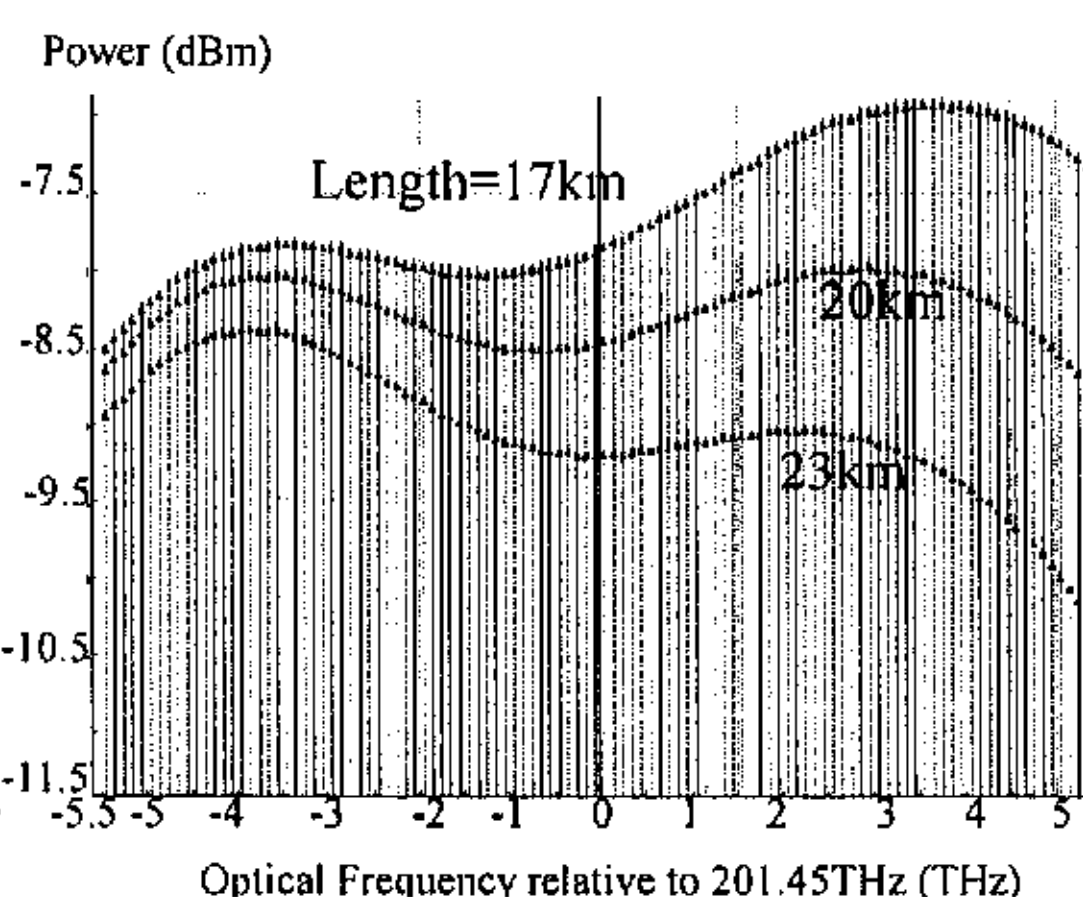


图 4-12 FRA 增益平坦度随光纤长度的变化关系

信号光和泵浦光的噪声功率随传输距离的变化关系如图 4-11 所示。为了能够更好的看清信号光噪声功率随传输距离的变化情况,我们同样在图中只选取

了高频，中频和低频信号光各一束。从图中可以看出在光纤前端信号的噪声功率很小，而泵浦信号的噪声功率与之相比要大的多，但在光纤末端泵浦信号噪声功率却很小，而与之相比信号噪声功率却较大，这一现象是由 FRA 的泵浦结构所决定的。由于是反向泵浦，末端的泵浦噪声功率当然很小，在沿光纤传输过程中产生的噪声在光纤前端累积，因此在该处泵浦噪声功率较大，信号光也有相似的过程，只是噪声积累发生在末端。我们从图中还可以发现泵浦的噪声功率沿后向传输时都是先增加而后又缓慢减少，且频率越高，噪声越小。泵浦噪声不是一直积累的，而是有一个噪声削减的过程，这是因为自发喇曼噪声在传输过程中先是不断被放大，而后泵浦功率降到临界泵浦功率以下而使自发喇曼噪声被光纤损耗的缘故，这也正是 FRA 比 EDFA 有更小噪声的原因。信号的噪声功率在整个传输过程中一直增加，并且存在一个拐点（16km），在这个点以前，高频信号噪声功率小于低频信号噪声功率，而在其另一侧，情况刚好相反，这主要是由光纤损耗、泵浦与信号以及泵浦与泵浦之间的 SRS 共同决定的。

我们还研究了这样一个 FRA 增益平坦度随光纤长度的变化关系，如图 4-12 所示，从图中可以清楚的看到，FRA 增益平坦度及 1dB 带宽受光纤长度的影响很大，3km 的长度变化就能引起 1dB 平坦度的恶化。所以在设计 FRA 时需仔细考虑放大器的长度对系统的影响，根据系统参数进行优化设计。

4.4 基于宽带光纤喇曼放大器的波分复用高速光纤通信系统研究

4.4.1 仿真系统模型

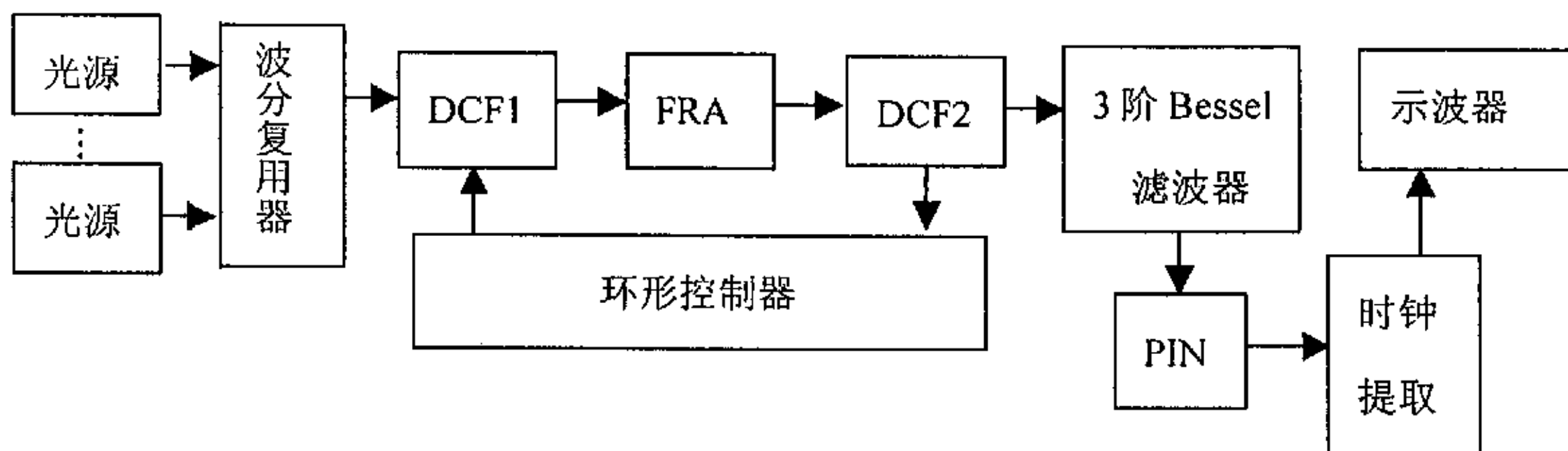


图 4-13 仿真系统模型图

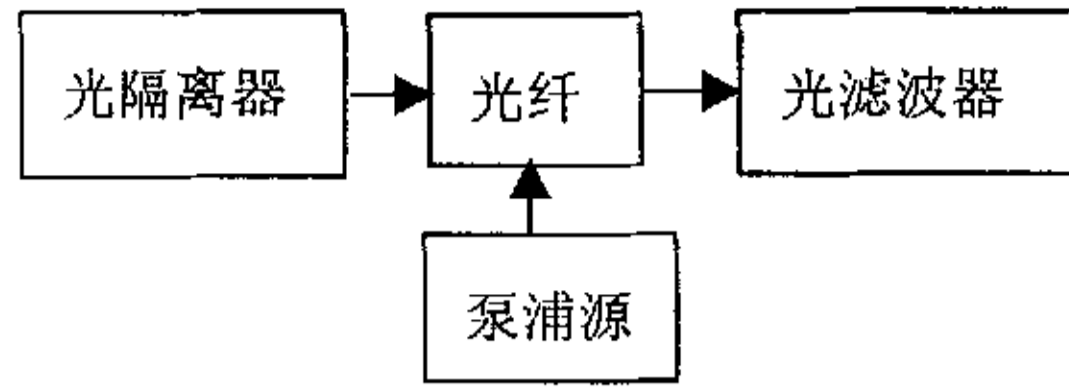


图 4-14 FRA 结构框图

表 4-3 系统的一些关键参数值

第 1 路信道频率	210.3THz(1.5W)	FRA 泵浦频率 (功率)	203.5THz(185mW)
信道间隔	100GHz	FRA 泵浦频率 (功率)	191.5THz
复用信道数	41	DCF 有效模场面积	$50 \mu\text{m}^2$
DCF 色散系数	$-90 \times 10^{-6} \text{s/m}^2$	DCF 非线性系数	$2.6 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$

表 4-4 仿真试验中将要研究的参数

a	0.2	FRA 有效模场面积	$80 \mu\text{m}^2$
FRA 色散系数	$15 \times 10^{-6} \text{s/m}^2$	Bessel 滤波器带宽	50GHz
FRA 色散斜率	80s/m^3	FRA 长度	90km
瑞利后向散射系数	$6 \times 10^{-8} / \text{m}$	每信道入纤功率	0dBm
FRA 非线性系数	$2.6 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$	FRA 放大级数	6

试验中用到的仿真系统模型如图 4-13 所示。在该试验中我们采用 41 路信道，每信道采用 7 阶伪随机非归零码，信道速率为 40Gb/s，第一路信道的频率为 191.5THz，信道间隔为 100GHz。41 路信号经波分复用器复用后，注入由环

形控制器控制的光纤段，该光纤段由 3 段光纤组成，从左至右分别是色散补偿光纤 (DCF1)，光纤喇曼放大器 (FRA) 和色散补偿光纤 (DCF2)，在环形控制器的控制下，光信号经过 6 个放大级后输出，经 3 阶 Bessel 滤波器后提取出测试信道 (在该试验中为第 41 信道)，再经光电二极管 (PIN) 和时钟提取后输出到示波器上进行观测。试验中两段 DCF 除了长度不同外，其余参数完全相同，两段 DCF 长度之和为一定值，它们不仅完全补偿了 FRA 的色散，还完全补偿了 FRA 的色散斜率。两 DCF 的长度由一个比例系数 (a) 决定，DCF1 的长度为长度之和与 a 的乘积。FRA 在光信号频谱范围内具有平坦增益 (增益起伏小于 0.5dB)，采用两个泵浦源后向泵浦以减小噪声，FRA 的结构框图如图 4-14 所示，光隔离器消除了后向瑞利散射的信号光和残留泵浦光对前一级放大系统的影响，光滤波器使信号光无损通过，消除了后向瑞利散射的泵浦光对下一级放大系统的影响，同时消除了信号频带外放大的自发辐射 (ASE) 噪声的累积。系统的其余参数如表 4-3 所示。在以下仿真试验过程中，所有与信号频率有关的参数值均是 193.5THz 处的值。在接下来的仿真试验中，我们将研究表 4-4 中所列的各参数对 BER 的影响，在研究某一参数与 BER 的关系时，其余各参数保持不变。

4.4.2 仿真试验结果及其讨论

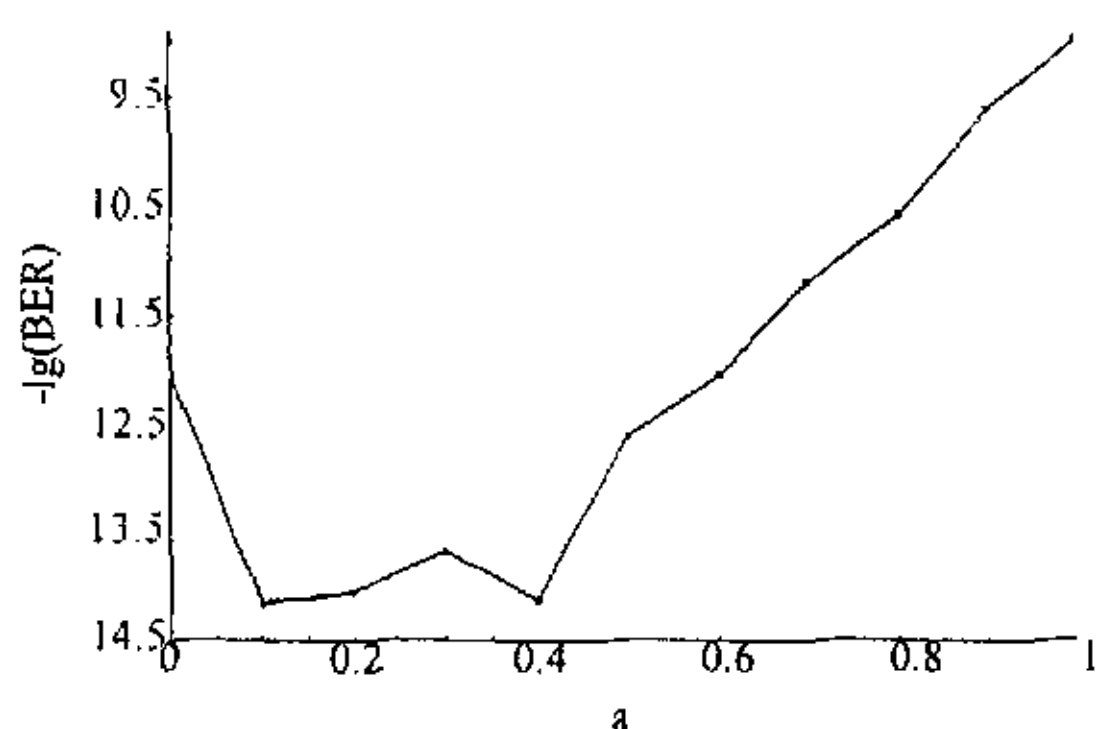


图 4-15 $-\lg(\text{BER})$ 随 a 的变化关系曲线

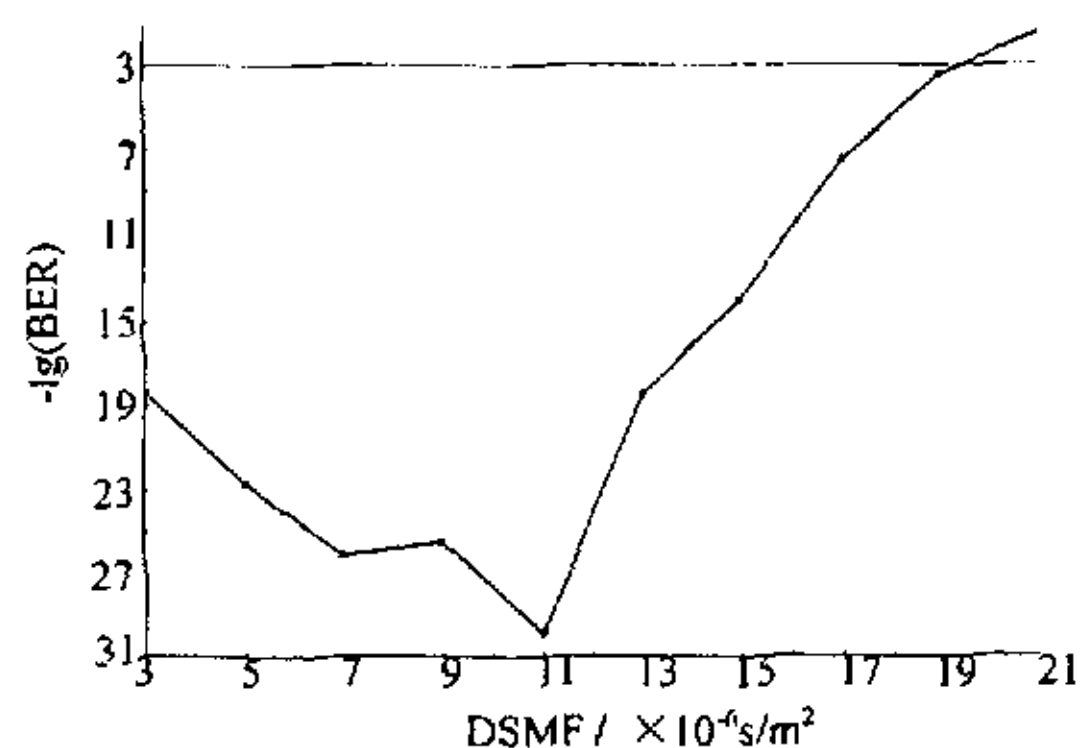


图 4-16 $-\lg(\text{BER})$ 随 DSMF 的变化关系曲线

40Gb/s 光纤传输系统中光脉冲占有较小的比特时隙，与 10Gb/s 光纤传输系统相比要求更高的入纤功率，这将必然导致比 10Gb/s 系统更高的非线性损伤，合理的配置 DCF 可以改善系统的传输性能。图 4-15 给出了 $-\lg(\text{BER})$ 随 a 的

变化关系曲线。从图中我们可以看出，当 a 在 0.1—0.4 范围内变化时，BER 保持了较小值，当 a 进一步增大时，BER 迅速增加。这种现象说明，当 DCF1 长度为 0 时，光信号经过 FRA 放大后具有较大信号光功率，信号在 DCF2 中产生非线性损伤，系统 BER 降低，当 DCF1 长度较大时，光信号经过 DCF1 后功率很低，信号淹没在噪声中，OSNR 很小，直接导致系统 BER 升高。因此在设计系统时应尽量减小 DCF1 的长度以提高系统传输性能。

图 4-16 给出了 $-\lg(\text{BER})$ 随 FRA 色散系数 (DSMF) 的变化关系曲线。从图中可知当 FRA 色散系数在 $3-15 \times 10^{-6} \text{s/m}^2$ 范围内变化时，系统均保持较小的 BER，在色散系数为 $11 \times 10^{-6} \text{s/m}^2$ 处 BER 达到最小，而后随着色散系数的继续增加，BER 开始变大。因此我们在设计光纤时应在工艺要求的范围内尽量减小光纤的色散系数，从而达到更好的系统性能。从图中还可以看出，当光纤的色散系数增大到一定值后，即便采用色散补偿光纤完全补偿系统的色散，系统的性能仍然变的很差。

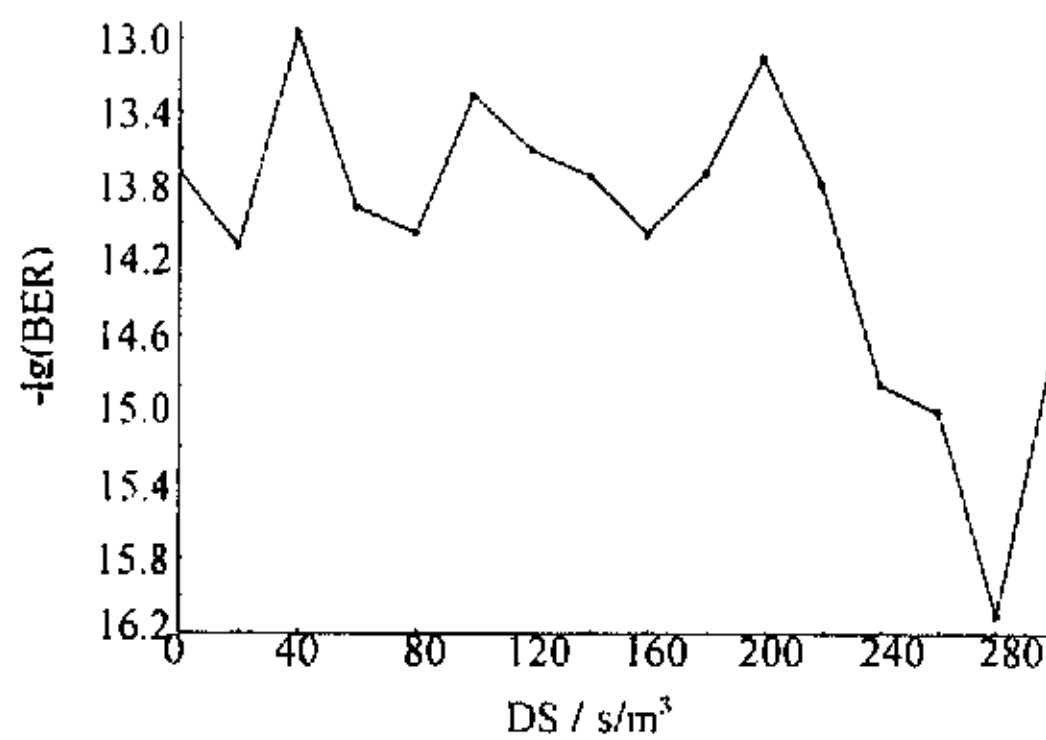


图 4-17 $-\lg(\text{BER})$ 随 DS 的变化关系曲线

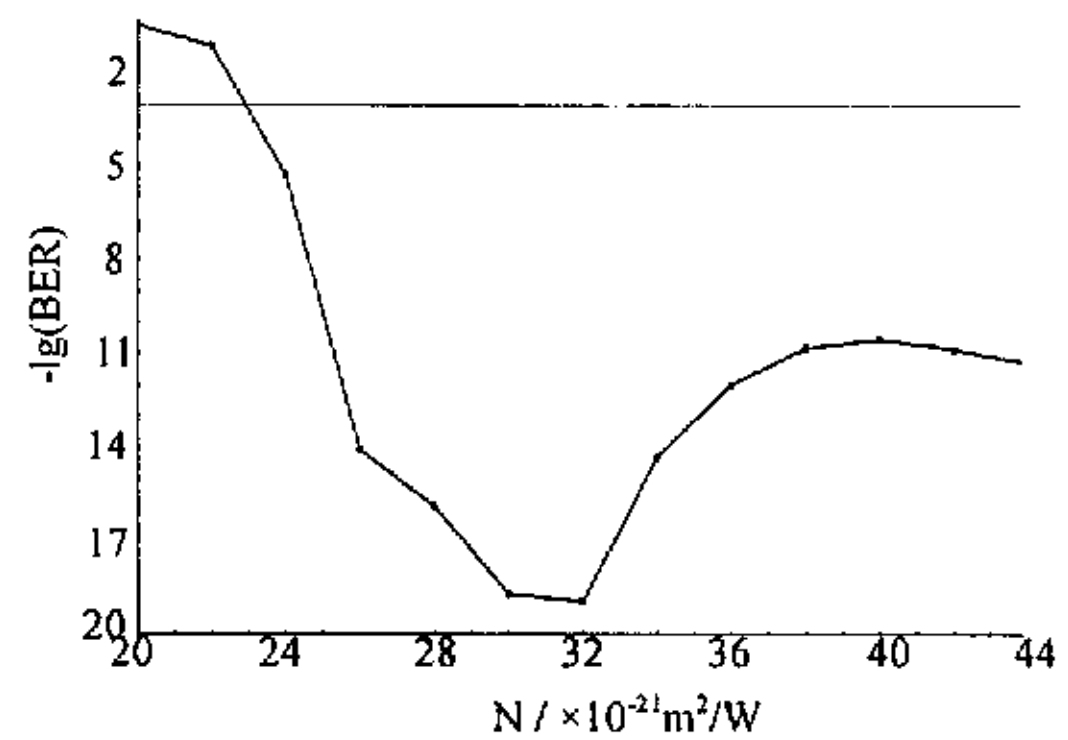


图 4-18 $-\lg(\text{BER})$ 随 N 的变化关系曲线

图 4-17 描述了 $-\lg(\text{BER})$ 随 FRA 色散斜率 (DS) 的变化关系曲线。从图中可以看出 FRA 的色散斜率在 $0-220 \text{s/m}^3$ 范围内变化时，系统的 BER 变化不大，当色散斜率在 $240-300 \text{s/m}^3$ 范围内变化时，系统的 BER 保持较小值。说明较大的色散斜率有利用系统性能的提高，因此在设计光纤时应尽量将其色散斜率设计得大一些。

图 4-18 描述了 $-\lg(\text{BER})$ 随 FRA 非线性系数 (N) 的变化关系曲线。从图中可以看出，由于较小的非线性系数，受激喇曼过程难于形成，因而信号得不

到放大，光信噪比很低，致使系统误码率很大；当非线性系数过大时，交叉相位调制、自相位调制以及四波混频等非线性效应变得严重起来，直接导致误码率变大。总的看来，较大的非线性系数仍使系统保持较低的 BER ($<10^{-11}$)，因此，设计光纤时还是应该将非线性系数设计的尽量大一些。

图 4-19 给出了 $-\lg(\text{BER})$ 随 FRA 有效模场面积 (area) 的变化关系曲线。从图中可以看出，FRA 有效模场面积较大时，受激喇曼过程效率变低，信号得不到充分放大，到达接收端时信号已经淹没在噪声中难于提取，因此误码率很高，随着有效模场面积的减小，喇曼效率变高，但当面积继续减小时，其它的非线性过程严重起来，因而影响了系统性能的进一步提高，系统误码率变大。BER 在有效模场面积为 $70 \mu\text{m}^2$ 时达到最小值。

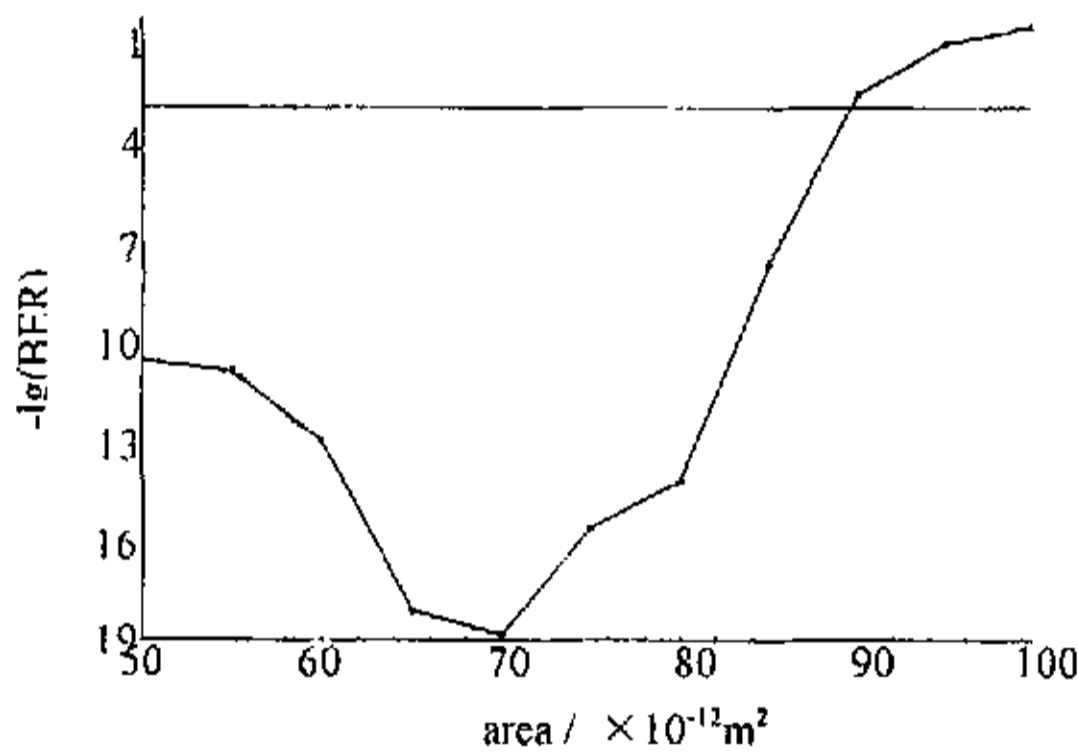


图 4-19 $-\lg(\text{BER})$ 随 area 的变化关系曲线

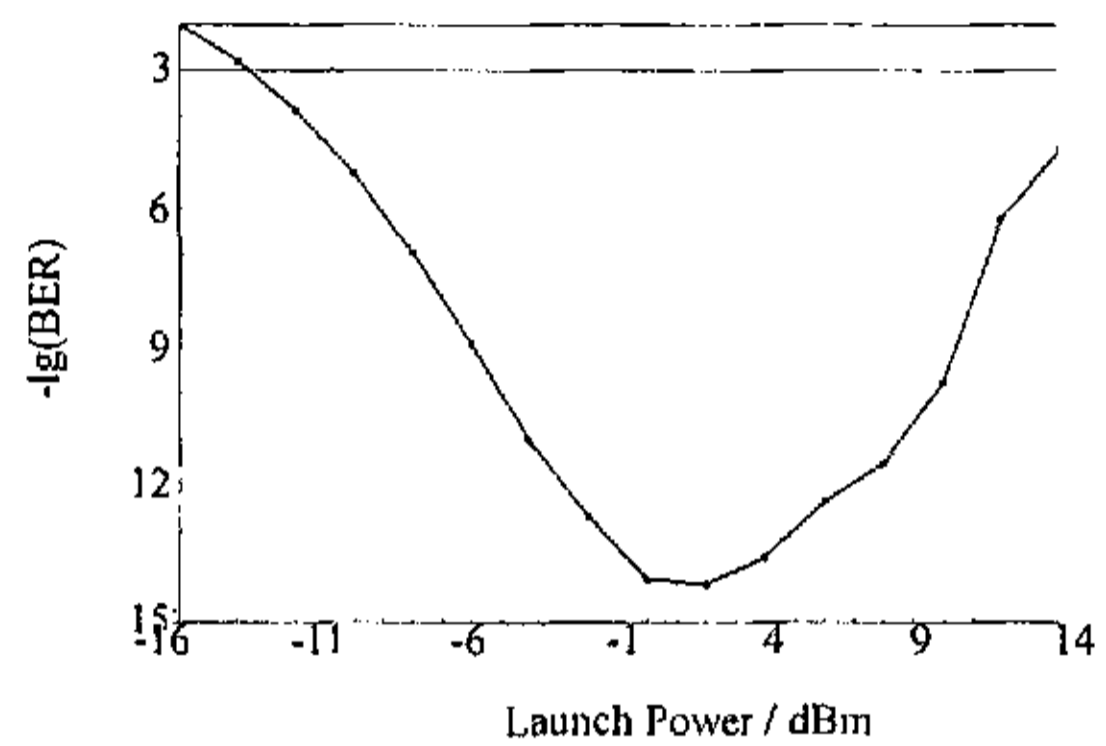


图 4-20 $-\lg(\text{BER})$ 随 Launch Power 的变化关系曲线

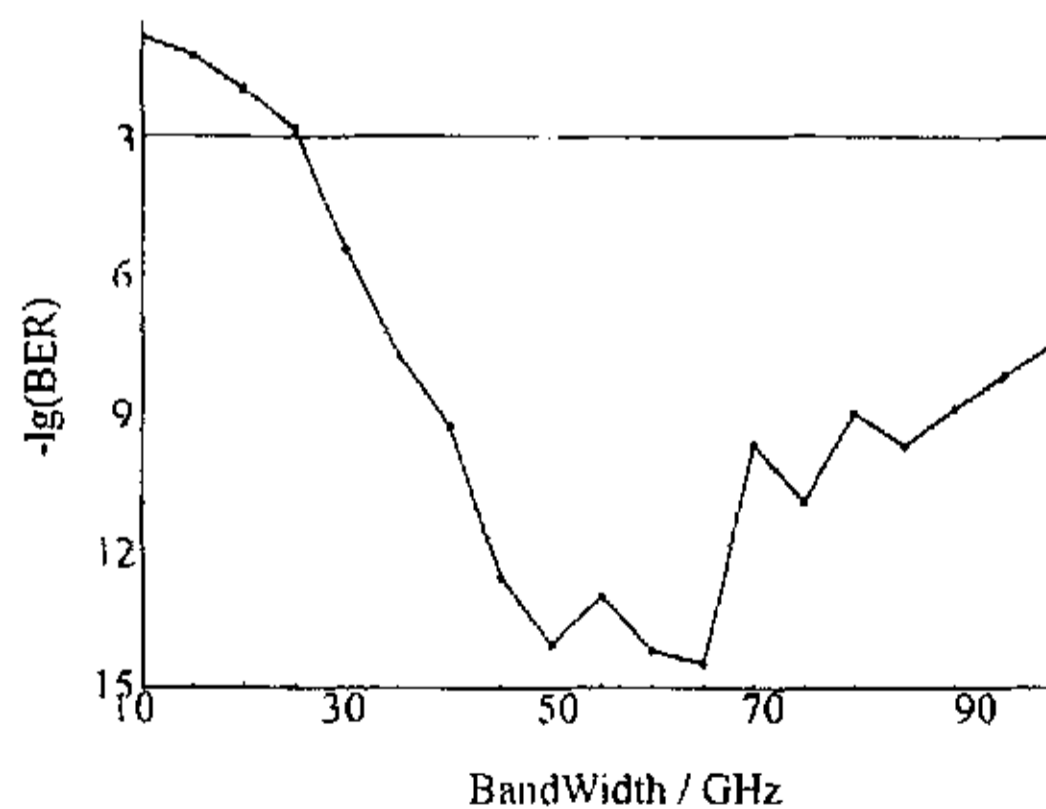


图 4-21 $-\lg(\text{BER})$ 随 BandWidth 的变化关系曲线

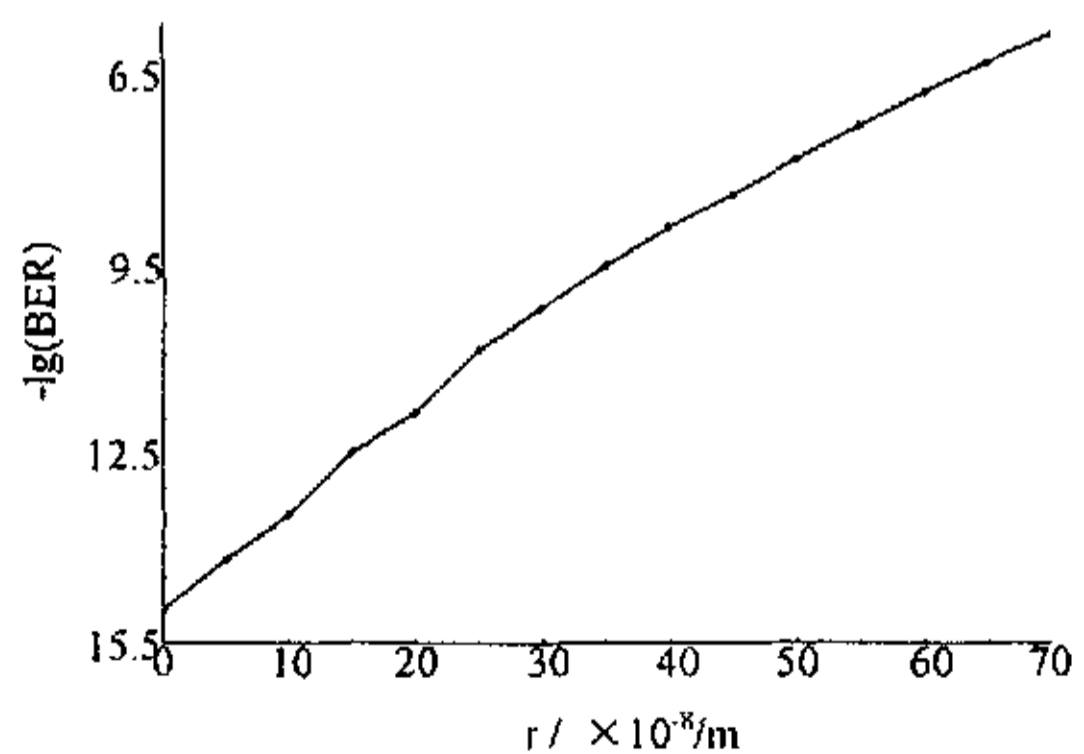


图 4-22 $-\lg(\text{BER})$ 随 r 的变化关系曲线

图 4-20 给出了 $-\lg(\text{BER})$ 随每信道入纤功率 (Launch Power) 的变化关系曲线。从图中可以看出, 入纤功率较小会直接导致接收端光信噪比的恶化, 入纤功率过大将会导致信号的非线性损伤增加, 同样使得系统的性能下降。两种因素的影响有个折中, 在入纤功率为 2dBm 时整个系统的性能达到最佳。

图 4-21 给出了 $-\lg(\text{BER})$ 随 Bessel 滤波器带宽 (BandWidth) 的变化关系曲线。从图中可知, 较小的滤波带宽会直接影响信号的接收质量, 而较大的接收带宽又无法滤除信号频带以外的噪声, 致使信噪比降低。因此合理的选择接收带宽直接影响着系统的性能。由图可知, 对于这样的一个滤波器带宽设定在 50—65GHz 较好。

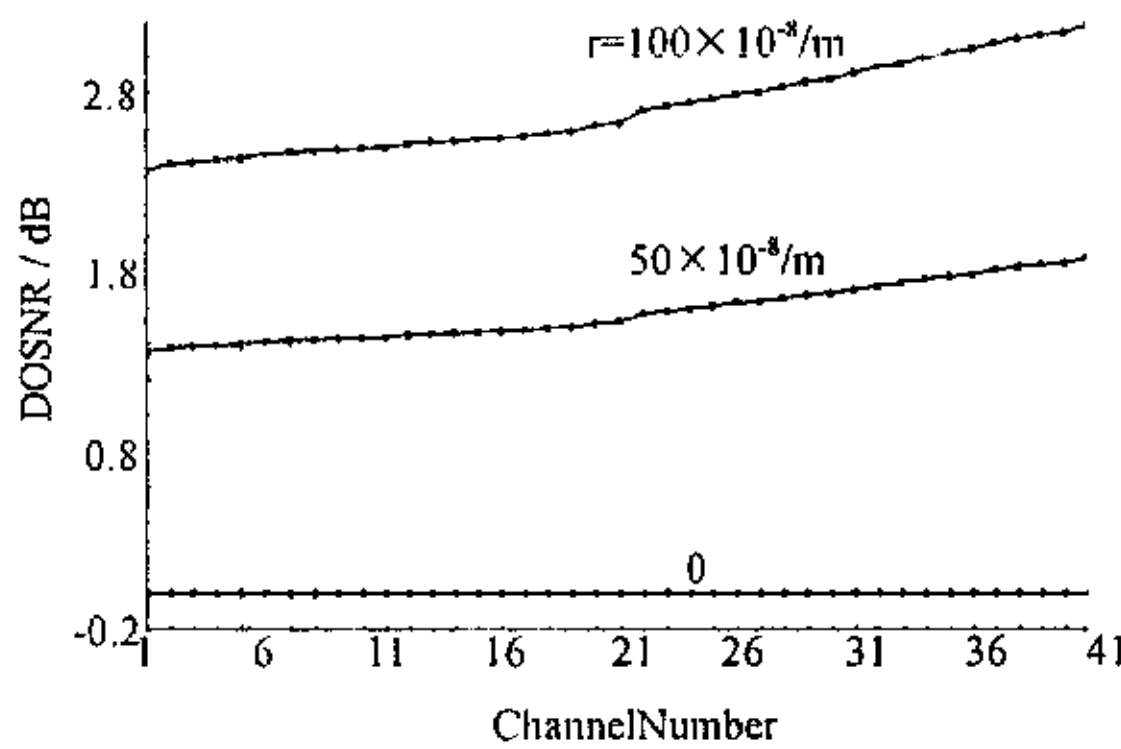


图 4-23 不同后向瑞利散射系数下, 不同信道经过 FRA 后的光信噪比的减少值

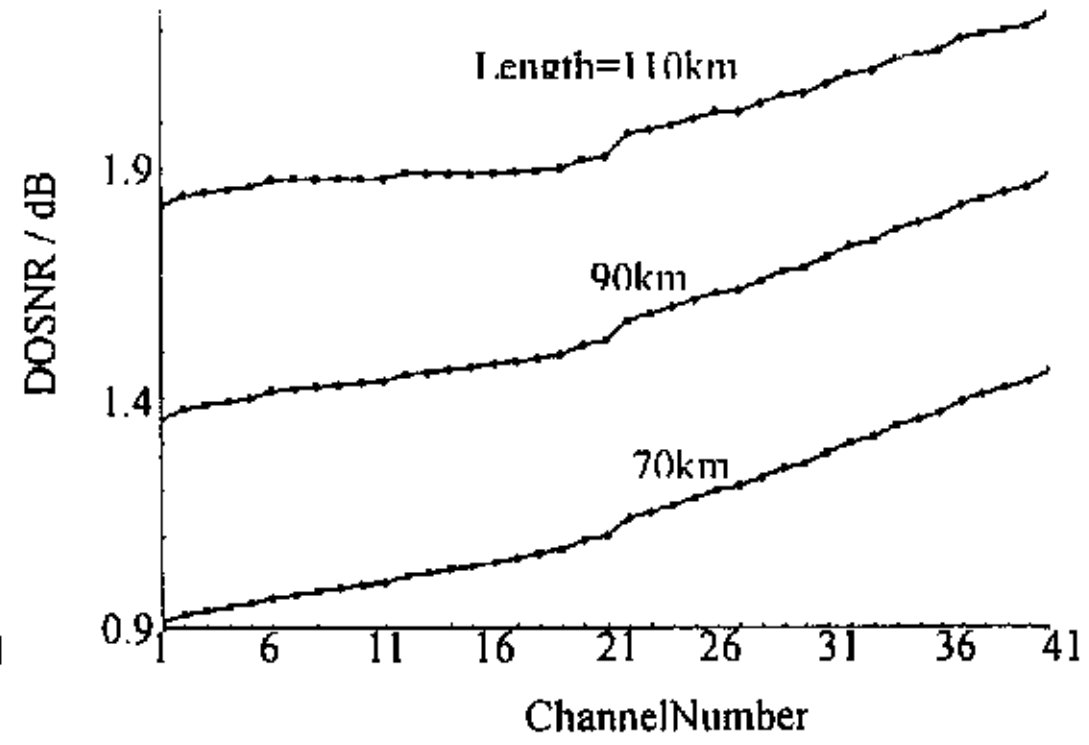


图 4-24 在不同 FRA 长度下, 不同信道经过 FRA 后的光信噪比的减少值

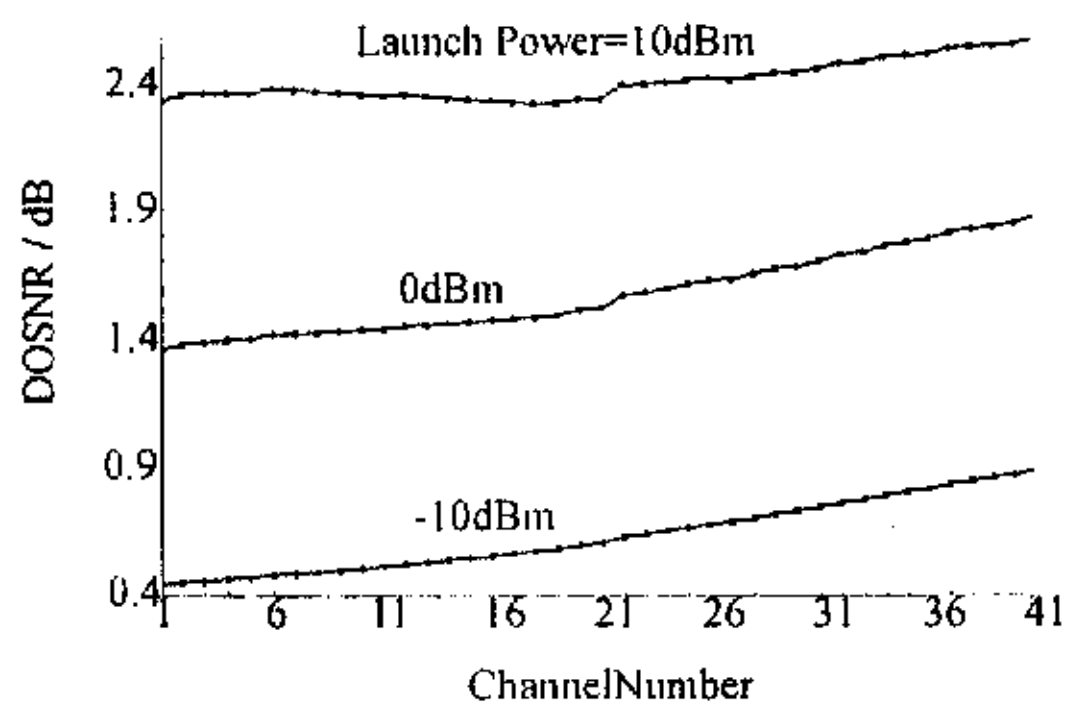


图 4-25 不同入纤功率下, 不同信道经过 FRA 后的光信噪比的减少值

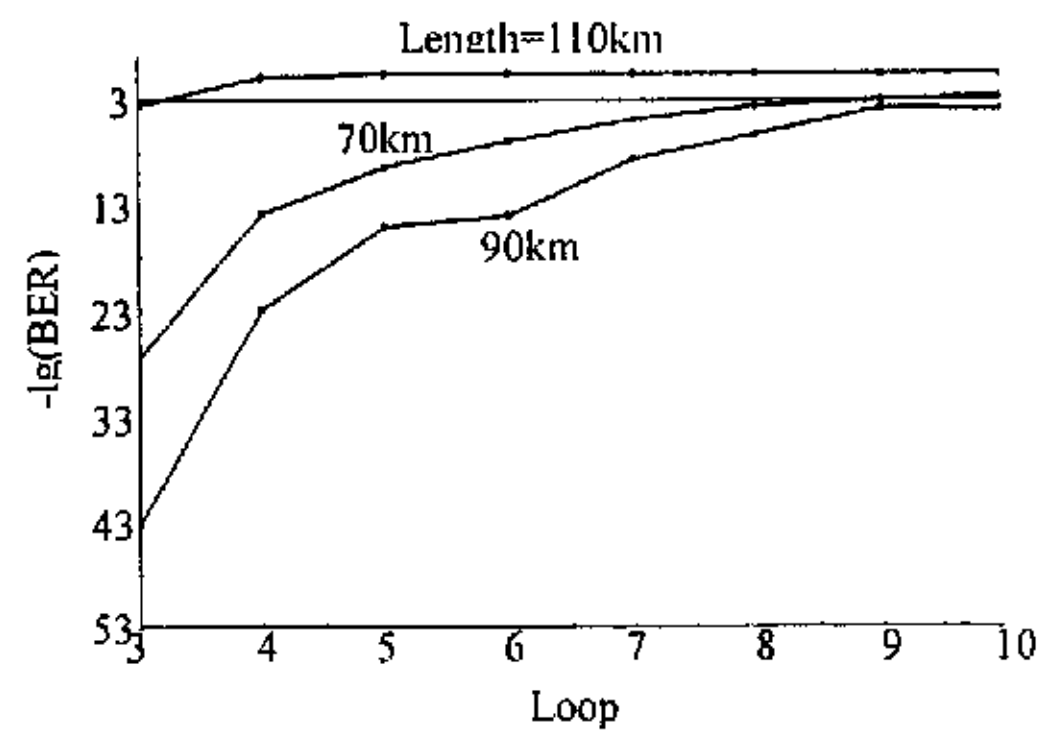


图 4-26 不同 FRA 长度下放大器级数与 $-\lg(\text{BER})$ 的关系曲线

与基于 EDFA 的集总式光放大系统不同,后向瑞利散射噪声在基于 FRA 的放大系统中不能忽略,它成为基于 FRA 的长距离光纤传输系统的一个限制因素。图 4-22 给出了 $-\lg(\text{BER})$ 随 FRA 后向瑞利散射系数 (r) 的变化关系曲线。从图中可以清楚的看到系统 BER 随 r 几乎成线性增加。如果信号较大,还可能在 FRA 内形成多次瑞利散射,对同频光信号进行干扰,同时消耗泵浦功率,使信号得不到充足的放大。图 4-23 给出了在不同后向瑞利散射系数下,不同信道经过 FRA 后的光信噪比的减少值 (DOSNR)。从图中可以看出随着后向瑞利散射系数的增加, DOSNR 变大,对于相同的瑞利后向散射系数,高频信道比低频信道的 OSNR 降低的多。这是因为瑞利散射与信号频率的四次方成正比的缘故。图 4-24 给出了在不同 FRA 长度 (Length) 下,不同信道经过 FRA 后的光信噪比的减少值 (DOSNR)。由图可知,随着 FRA 光纤长度的增加,瑞利散射引起的 DOSNR 变得越大,说明光纤越长,瑞利散射对系统性能的影响越严重,但这并不表示在设计系统时 FRA 的长度越小越好,因为在给定泵浦功率和频率的情况下,FRA 长度的减小意味着经 FRA 放大后输出的信号光功率越强,当经过 DCF 进行色散补偿时,必然产生严重的非线性损伤,使系统性能恶化(见图 4-26),因此在设计系统时应兼顾两方面影响。图 4-25 给出了在不同入纤功率情况下,不同信道经过 FRA 后的光信噪比的减少值 (DOSNR)。从图中可以看出信号的入纤功率越大,瑞利散射致使的光信噪比的减少也就越多。因此,在设计长距离光纤传输系统时应在满足接收机灵敏度前提下尽量降低系统的入纤功率。图 4-26 给出了不同 FRA 长度下放大器级数与 $-\lg(\text{BER})$ 的变化关系曲线。从图中可以看到,对于泵浦功率和频率一定时,经过相同的放大级数,并不是光中继距离越小越好,当光中继距离较大时,由于信号损耗较大因此 OSNR 降得很低,并且此时后向瑞利散射噪声也相当大致使系统性能降低,当光中继距离较小时,后向瑞利散射噪声减小,信号获得较高的增益,因此信号功率很强致使系统的非线性损伤增加,降低了系统的性能。因此对于一定的泵浦功率和频率,存在一个最佳的光中继距离。

4.5 本章小结

在本章第一节中介绍了一种快速的宽带光纤喇曼放大器的设计方法，该方法分两步进行：第一步先将低频泵浦信号去掉，通过对中频泵浦信号的频率和光功率进行搜索，可以使两个边缘的信号光功率的平均值等于中间光信号频率处的功率值；第二步加入低频泵浦信号，巧妙利用 SRS 过程中泵浦光能量之间的转移，可以设计出指定波段的宽带光纤喇曼放大器。在接下来一节中对所设计的宽带光纤喇曼放大器的特性及在放大过程中泵浦光与信号光，信号光与信号光，泵浦光与泵浦光之间的相互作用进行了仿真研究，同时对宽带 FRA 的噪声特性也进行了研究。在第三节中，利用 VPITransmissionmaker 仿真试验平台，对基于宽带光纤喇曼放大器的 WDM 高速光纤通信系统进行了较详细地研究，得到了色散补偿光纤的配置、光纤喇曼放大器的色散系数、色散斜率、有效模场面积、非线性系数、后向瑞利散射系数、入纤功率、Bessel 滤波器带宽以及光纤喇曼放大器长度对系统误码率的影响关系，同时对严重影响长距离光纤传输系统性能的后向瑞利散射噪声对光信噪比及误码率的影响也作了较详细地研究。研究表明，在 40Gb/sWDM 高速光纤通信系统中，通过合理配置 DCF，适当减小 FRA 的色散系数，增加色散斜率，提高非线性系数并且选择合适的入纤功率，FRA 有效模场面积和接收机带宽，宽带长距离光纤传输是可以实现的。

第五章 宽带混合光纤放大器（光纤喇曼放大器+掺铒光纤放大器）的设计及其在波分复用高速光纤通信系统中的应用研究

5.1 研究背景

随着计算机网络及其它新的数据传输业务的飞速发展，如何提高光纤传输系统容量、增加无电再生中继传输距离已经成为光纤通信领域研究的热点。掺铒光纤放大器（EDFA）由于受其固有的能级跃迁机制所限，只能提供 30nm 的不平坦增益带宽，无法满足长距离宽带传输的要求。EDFA 可以通过以下几种方法增加和平坦增益带宽：（1）使用增益均衡器；（2）改变光纤组分，使用掺铒氟化物光纤放大器或掺铒碲化物光纤放大器；（3）构成多级 EDFA 放大系统；（4）在 C 波段和 L 波段同时实现并行放大；（5）EDFA 和 FRA 组成的混合光纤放大器（HFA）。由于 HFA 不仅能够实现 EDFA 增益谱平坦，而且能够增加无电再生中继距离，同时减小光信号的非线性损伤，延长传输距离，提高光纤通信系统的传输性能，因此方案（5）已成为 WDM 系统升级换代最具潜力的方法。但在已经报导的试验研究中，为了减小放大器增益起伏，HFA 中都不可避免的加入了损耗较大的增益均衡器，这样不仅能量利用率低而且设备复杂性增加，同时很多文献都以 3dB 作为衡量增益起伏的标准，这对中短距离传输系统比较适合，但对长距离传输系统存在明显的弊端：经过几个放大级后，处于增益峰处的信号功率越来越大，非线性损伤明显增加，而处于增益谷值处信号的光信噪比（OSNR）急剧恶化，这使得光纤传输距离被限制在几百公里以内^[98-102]。

在本章中我们用增益起伏 1dB 作为增益平坦的标准，先介绍了一种混合光纤放大器的设计方法：由于 EDFA 的增益谱在 193.1THz 和 195THz 之间呈上升趋势，只要适当设计 FRA 的泵浦频率和泵浦功率使其增益谱在 193.1THz 和 195THz 之间呈下降趋势，并且使上升幅度与下降幅度相当，就有可能设计出指定波段内的增益平坦的 HFA；接下来设计了一个平坦带宽为 11.4THz，增益达到 7.5dB，覆盖整个 C+L 波段的宽带 HFA，该 HFA 由一个后向泵浦的分布式 FRA 和一个后向泵浦的集总式 EDFA 组成，在整个 HFA 设计中没有使用任何的增益均衡器。我们对该 C+L 波段的宽带混合光纤放大器增益特性和噪声特性进行了仿真研究。最后提出了一种用光滤波器抑制噪声的有效方法，并将该方法应用于波分复用高速光纤通信系统中，在 VPITransmissionmaker 仿真试验平台上，对入纤功率、光纤喇曼放大器的色散系数、色散斜率、有效模场面积、非线性系数、Bessel 滤波器带宽、光纤喇曼放大器长度以及非归零码中 1 码出

现的概率对系统误码率的影响进行了仿真研究。实验结果对基于 HFA 的 WDM 光纤传输系统设计具有一定的参考意义。

5.2 一种混合光纤放大器的设计

EDFA 在 1550nm 波长低损耗窗口有很好的增益谱特性,所以仿真设计中的信号光频率设计在 193.1THz 附近。EDFA 为集总式光放大器,在设计混合光放大器时,它主要用来实现光增益,一般光纤长度不超过 10m,且采用前向泵浦来降低噪声。FRA 为分布式光纤放大器,在设计混合光纤放大器时,它主要用来平滑 EDFA 的增益谱和提高光信噪比,采用后向泵浦,泵浦频率设定为 206.3THz 以使 FRA 在 193.1THz 处产生喇曼增益峰,提高整个 HFA 的增益。为了减小非线性效应,信号功率设定为 0.1mW。本仿真试验所设计的混合光纤放大器的结构如图 5-1 所示。将 FRA 放在 EDFA 之前是为了进一步提高 HFA 的光信噪比。

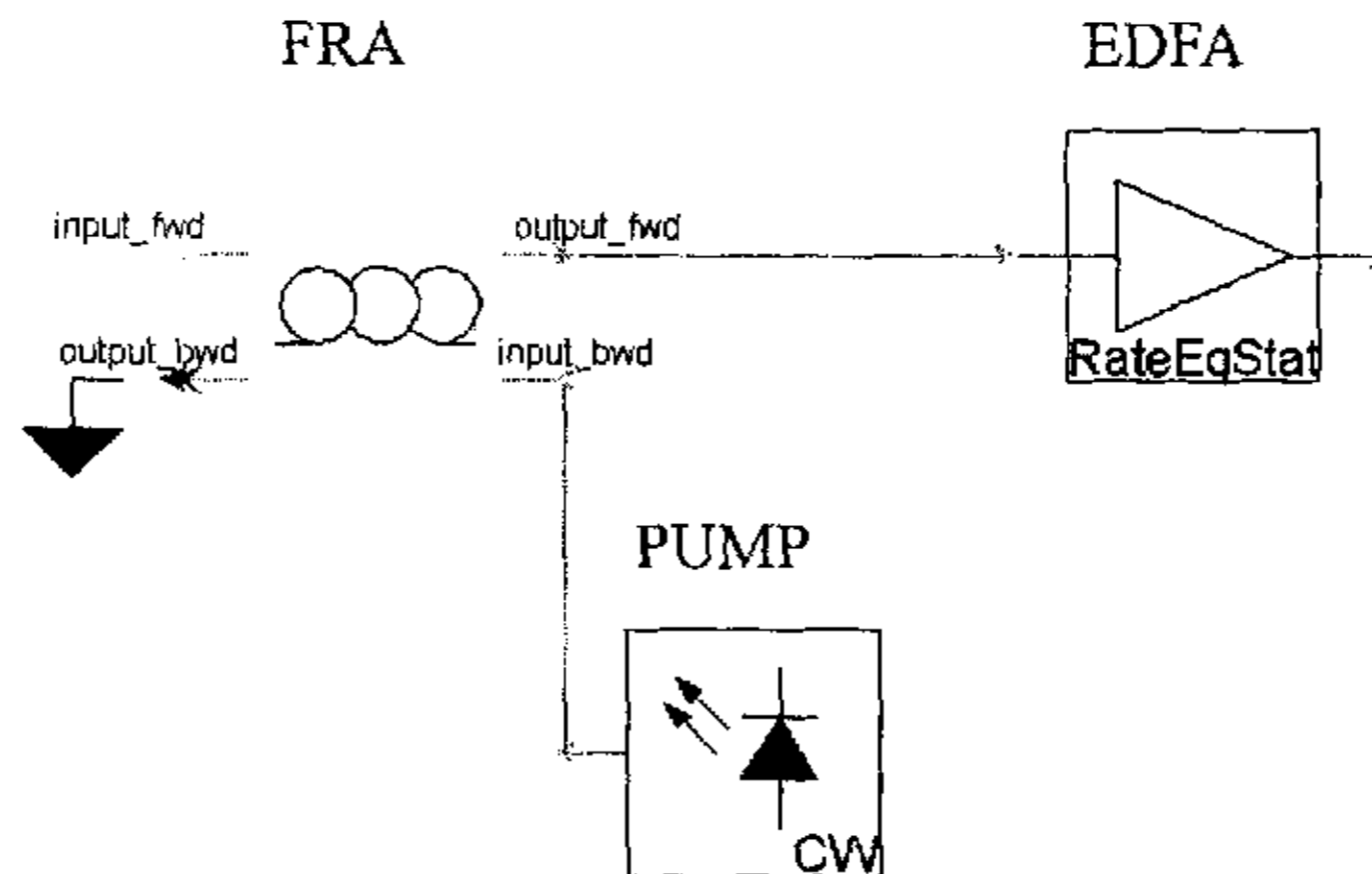


图 5-1 混合光纤放大器的结构图

5.2.1 掺铒光纤放大器参数设计

EDFA 随光纤长度(L)变化的增益(G)谱曲线如图 5-2 所示。从图中可以看出,不同光纤长度之间的增益谱曲线的变化规律基本相同,在 190—196THz 之间增益是随频率增加的,在 196—200THz 之间增益是随频率减小的,增益在 196THz 处有一极大值,并且随着光纤长度的增加,该极值也增加。EDFA 增益随前向泵浦功率变化的曲线如图 5-3 所示。从图中可以看出,增益随前向泵浦功率增

加而增加, 当前向泵浦功率大于 0.04W 时, 前向泵浦功率对 EDFA 增益影响已经不大了。EDFA 光信噪比(O)与前向泵浦光功率(P)和 EDFA 的长度之间的关系如图 5-4 所示。从图中可以看出前向泵浦功率增加基本不会改变光信噪比, 长度的增加使信噪比略微降低, 但在光纤长度小于 7m 范围内可以认为前向泵浦 EDFA 的光信噪比与泵浦光功率和光纤长度无关。综合考虑各方面的因素后, 确定 EDFA 的长度为 5m, 泵浦功率为 0.07W。

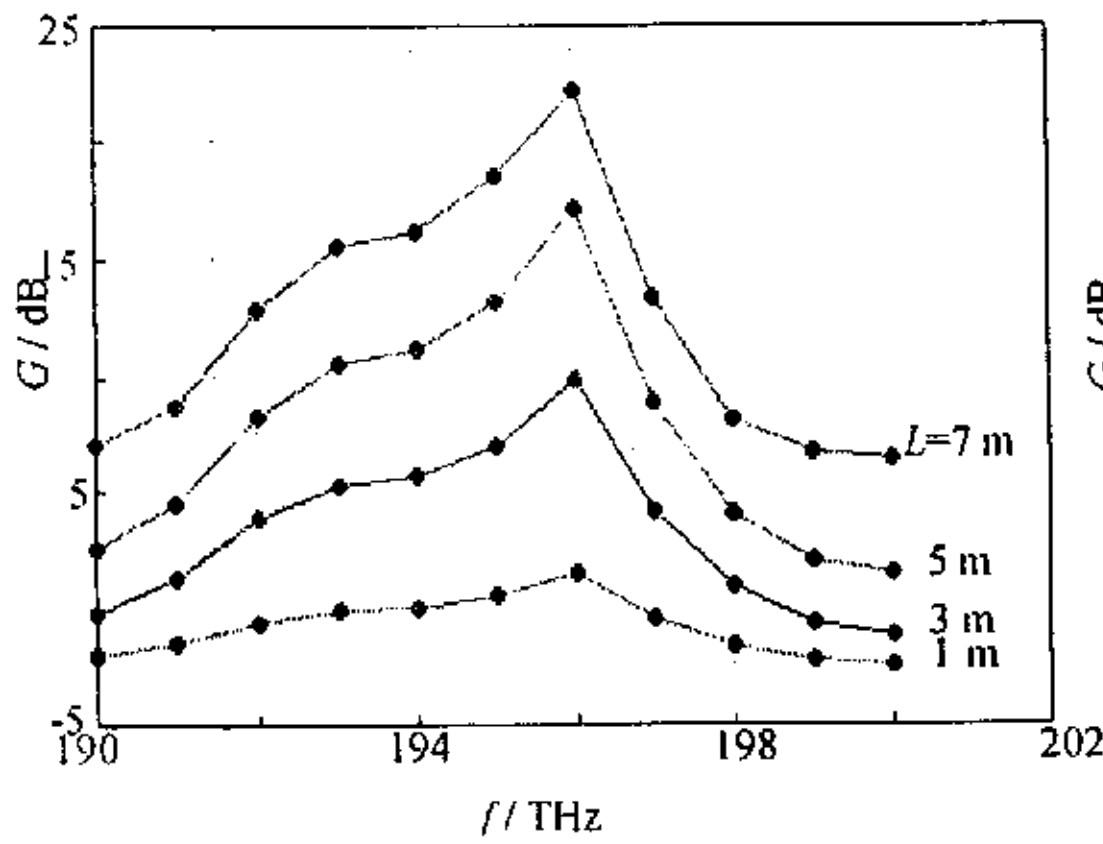


图 5-2 不同光纤长度下的 EDFA 增益谱曲线

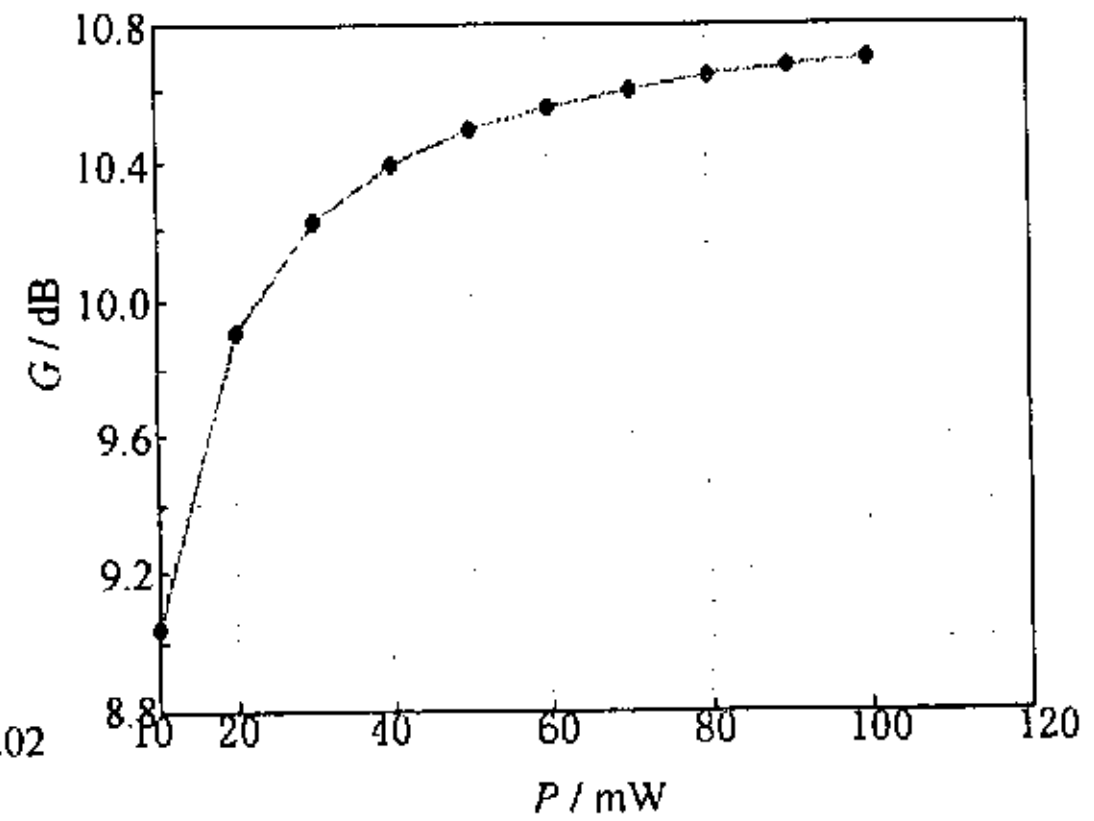


图 5-3 EDFA 增益随前向泵浦功率的变化曲线

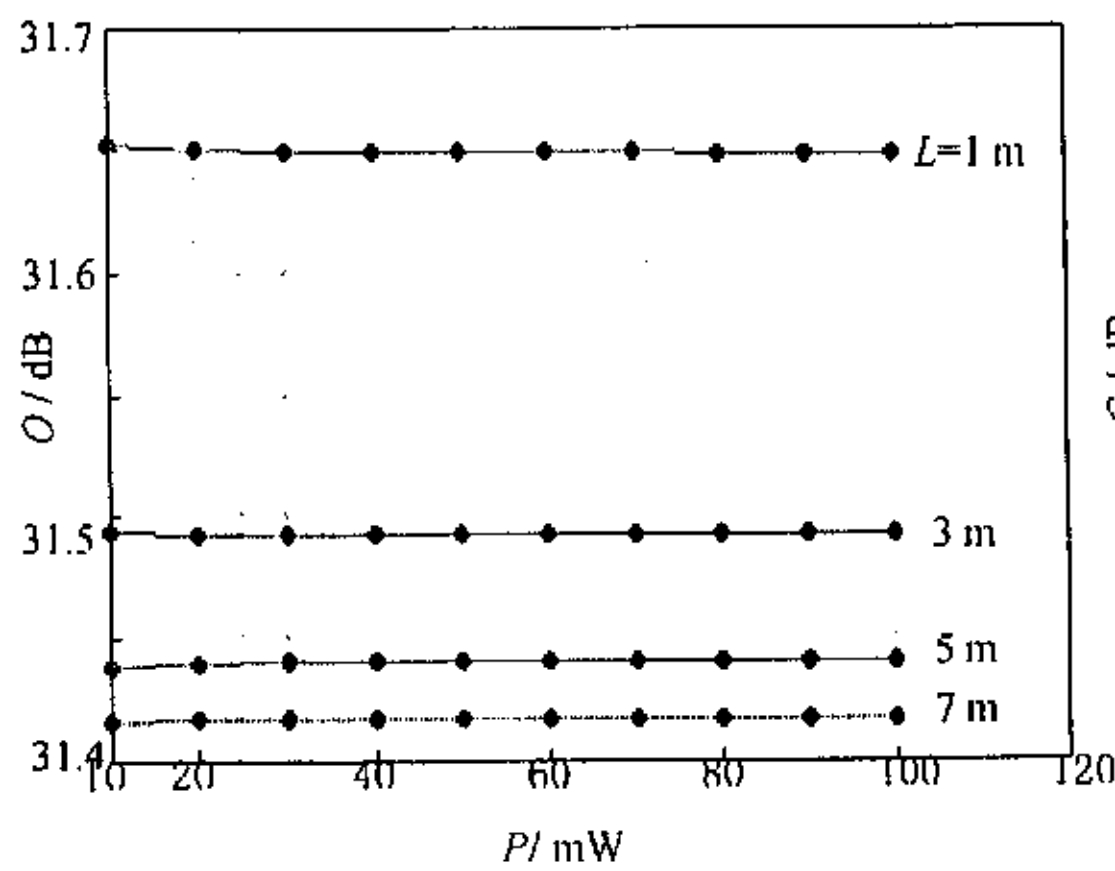


图 5-4 EDFA 光信噪比随前向泵浦功率和光纤长度变化关系曲线

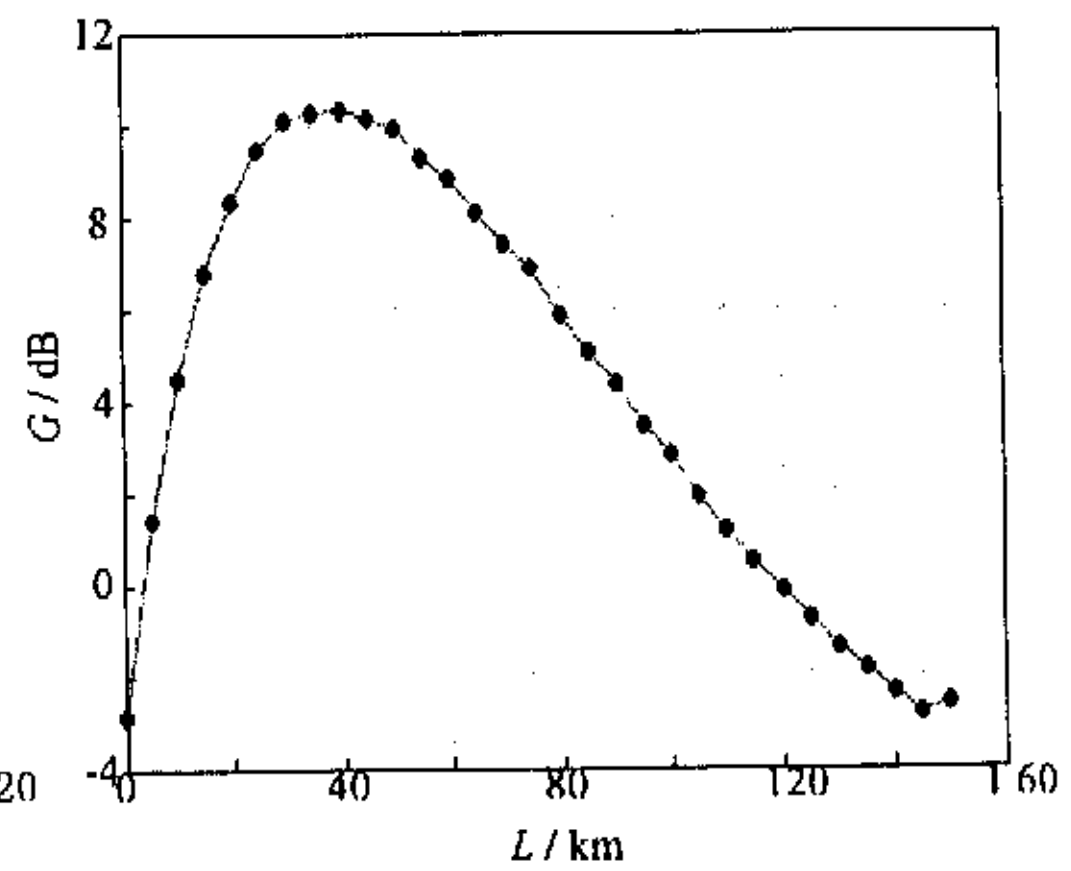


图 5-5 FRA 增益随光纤长度的变化曲线

5.2.2 光纤喇曼放大器参数设计

1) 喇曼光纤长度的确定

喇曼光纤放大器增益(G)随光纤长度(L)的变化曲线如图 5-5 所示。由图中可以看出, 在光纤长度小于 40 km 时, 喇曼增益随光纤长度的增加而单调增加; 在光纤长度大于 40km 时, 喇曼增益随光纤长度的增加而单调减小。喇曼光纤放大器光信噪比(O)随光纤长度的变化曲线如图 5-6 所示。从图中同样可以看出光信噪比随光纤长度的增加而单调减小, 在光纤长度小于 60km 时, 长度的变化基本不影响光信噪比。综合考虑两方面因素最后设计喇曼光纤长度为 75km。

2) 喇曼泵浦功率的确定

由于喇曼泵浦功率 (P) 的大小直接影响着混合光纤放大器的增益平坦度及其带宽, 所以喇曼泵浦功率的大小可以通过混合光纤放大器的增益谱曲线来确定。通过改变喇曼泵浦功率的大小使混合光纤放大器的增益在 193.1THz 附近有较小的起伏和最大的带宽, 从而确定出混合光纤放大器最小增益起伏时的喇曼泵浦功率。

当喇曼泵浦功率改变时, 混合光纤放大器的增益谱如图 5-7 所示。从图中可以看出, 增益随信号频率的增加并不是单调增加的, 在 192THz 至 197THz 之间有一较平坦的增益谱, 但随泵浦功率的不同, 平坦度又有不同。从图中可以清楚的看出, 当泵浦功率为 0.5W 时, 在 193THz 至 196THz 之间, 混合光放大器的增益起伏较小且带宽最宽, 于是设计喇曼泵浦功率为 0.5W。

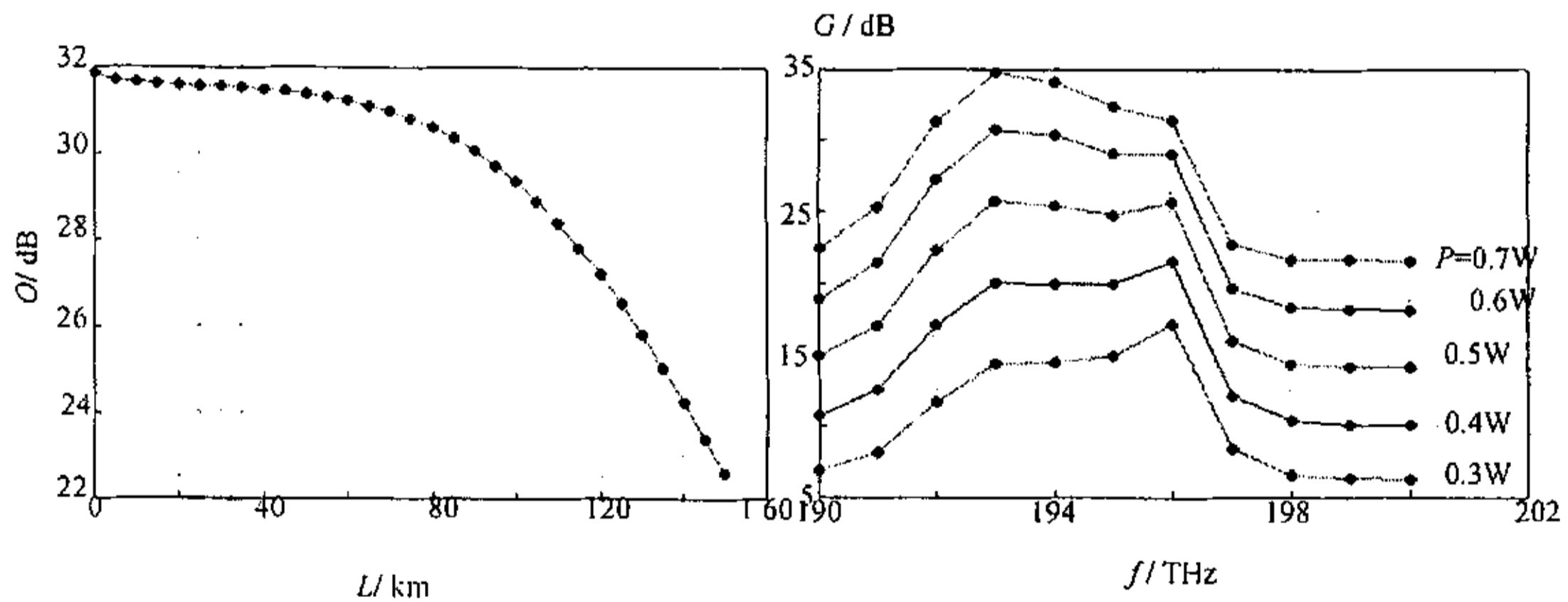


图 5-6 FRA 光信噪比随光纤长度的变化曲线 图 5-7 混合光纤放大器的增益谱随喇曼泵浦功率的变化曲线

5.2.3 混合光纤放大器参数设计

根据以上所设计的参数,将 FRA 和 EDFA 级连起来组成一个混合光纤放大器,该混合光纤放大器的主要参数已在表 5-1 中列出。图 5-8 和图 5-9 分别给出了该混合放大器的增益特性和光信噪比随信号光频率的变化关系曲线。从图 5-8 中可以看出该放大器的 3dB 带宽为 4.25THz,增益起伏小于 1dB 的带宽为 3.75THz,增益达到 25dB,在 193.1THz 附近仍有较大的光信噪比,达到 38.5dB。

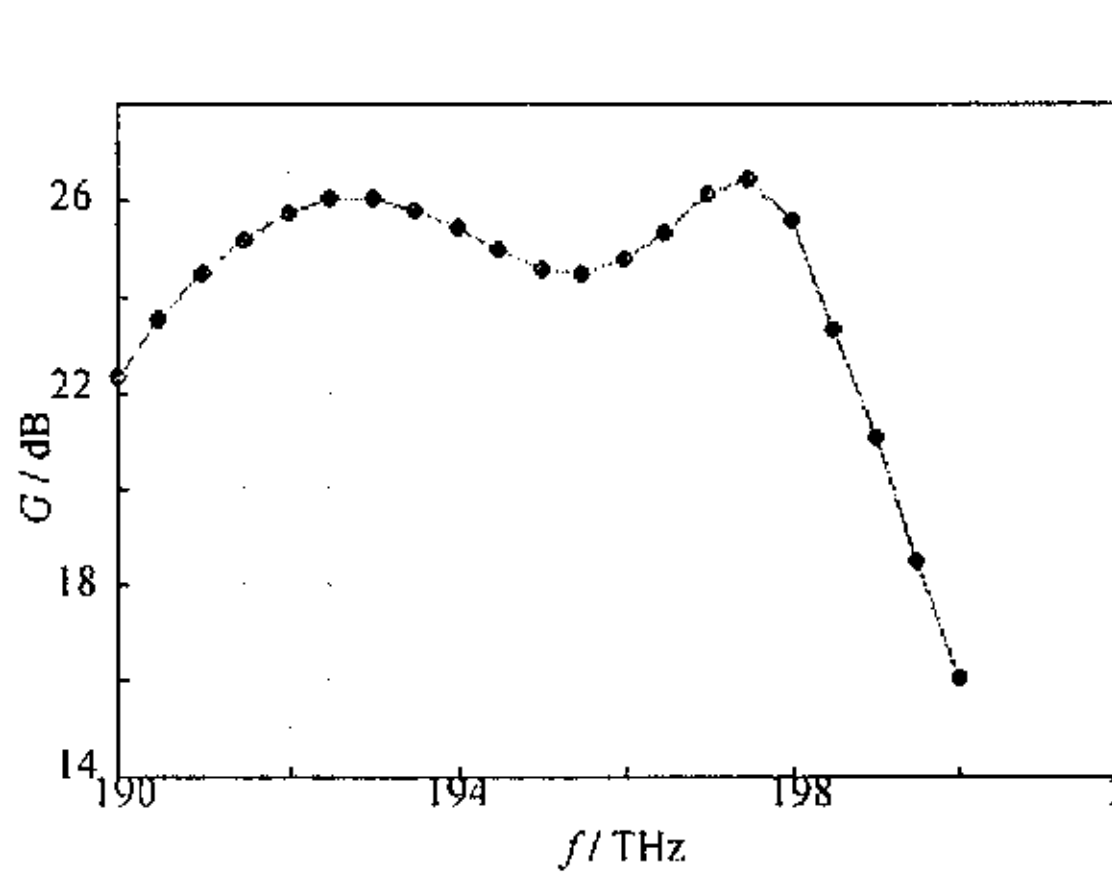


图 5-8 混合光纤放大器的增益特性

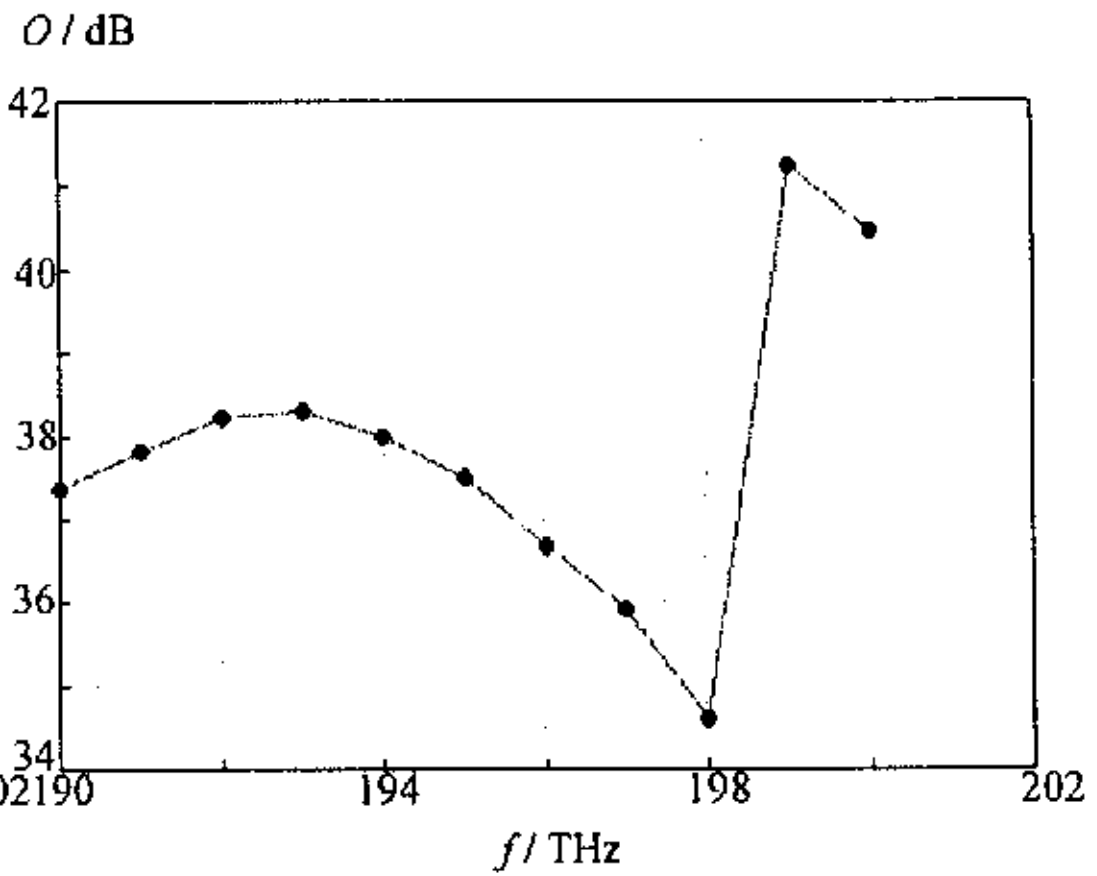


图 5-9 混合光纤放大器光信噪比随信号光频率的变化曲线

表 5-1 设计的 HFA 的各主要参数值

EDFA 长度	5m	FRA 后向泵浦频率	206.3THz
EDFA 前向泵浦波长	1480nm	FRA 后向泵浦功率	0.5W
EDFA 前向泵浦功率	0.07W	FRA 长度	75km

5.3 宽带混合光纤放大器的特性研究

5.3.1 宽带混合光纤放大器结构原理框图



图 5-10 HFA 设计原理框图

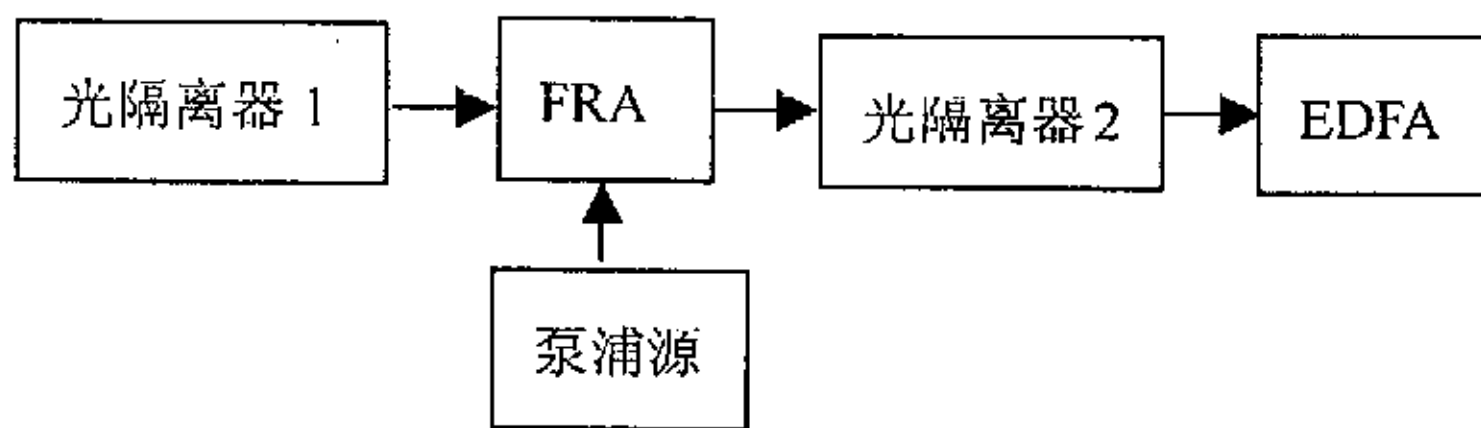


图 5-11 HFA 结构框图

表 5-2 设计 HFA 时的各参数值

信道间隔	100GHz	FRA 泵浦频率 (功率)	197THz(15mW)
信道功率	-20dBm	FRA 泵浦频率 (功率)	202.5THz(170mW)
信道数	115	FRA 泵浦频率 (功率)	209THz(900mW)
EDFA 长度	2m	起始信道频率	184.6THz
FRA 长度	80km	EDFA 泵浦波长(功率)	980nm(100mW)

图 5-10 为设计宽带混合光纤放大器时的结构原理框图。光源将 115 路 WDM 信号注入 HFA，经 HFA 放大后的信号输出到频谱仪上进行观察。HFA 结构框

图如图 5-11 所示。信号光经过 HFA 时先经过光隔离器 1，然后注入 FRA 进行放大，再经过光隔离器 2 注入 EDFA，最后输出。FRA 采用 3 泵浦源来平滑 EDFA 的增益曲线，使 HFA 的增益起伏小于 1dB。FRA 采用后向泵浦方式减小噪声，EDFA 也采用后向泵浦方式提高泵浦效率。光隔离器 1 的作用是抑制 FRA 中的双向瑞利散射噪声，光隔离器 2 的作用是限制 EDFA 中的后向瑞利散射光进入 FRA。为了使问题简单，我们假设光隔离器不引入插损，其余参数如表 5-2 所示。

5.3.2 宽带混合光纤放大器特性分析

图 5-12 给出了 115 路 WDM 信号注入 HFA 以前、经过 FRA 放大后以及经过 EDFA 后的光功率谱。从图中可以看出 -20dBm 的信号光经过 HFA 后功率增加到 -12.5dBm，HFA 的增益达到 7.5dB，增益起伏小于 1dB。信号光经过 FRA 时得到不同程度的放大，由于受激喇曼散射 (SRS) 和光纤损耗的共同作用，在信号频段的低频处产生一个峰值，而在高频处出现负增益，经过 EDFA 放大后信号光高频处获得增益使得最后输出的增益谱起伏小于 1dB。图 5-13 给出了 EDFA 单独工作以及 FRA 3 个泵分别单独作用时的输出信号功率谱。从图中我们可以看到 EDFA 在低频处由于激发态吸收严重致使低频信号光得不到放大，FRA 由于泵浦间 SRS 以及泵浦与信号间的 SRS 使得在低频处出现一个增益峰正好弥补了 EDFA 低频段增益不足的缺点，同时平滑了 EDFA 增益谱形。整个放大过程中的能量转移以及增益峰的产生可以用下面的图 5-14 简单明了的表达。

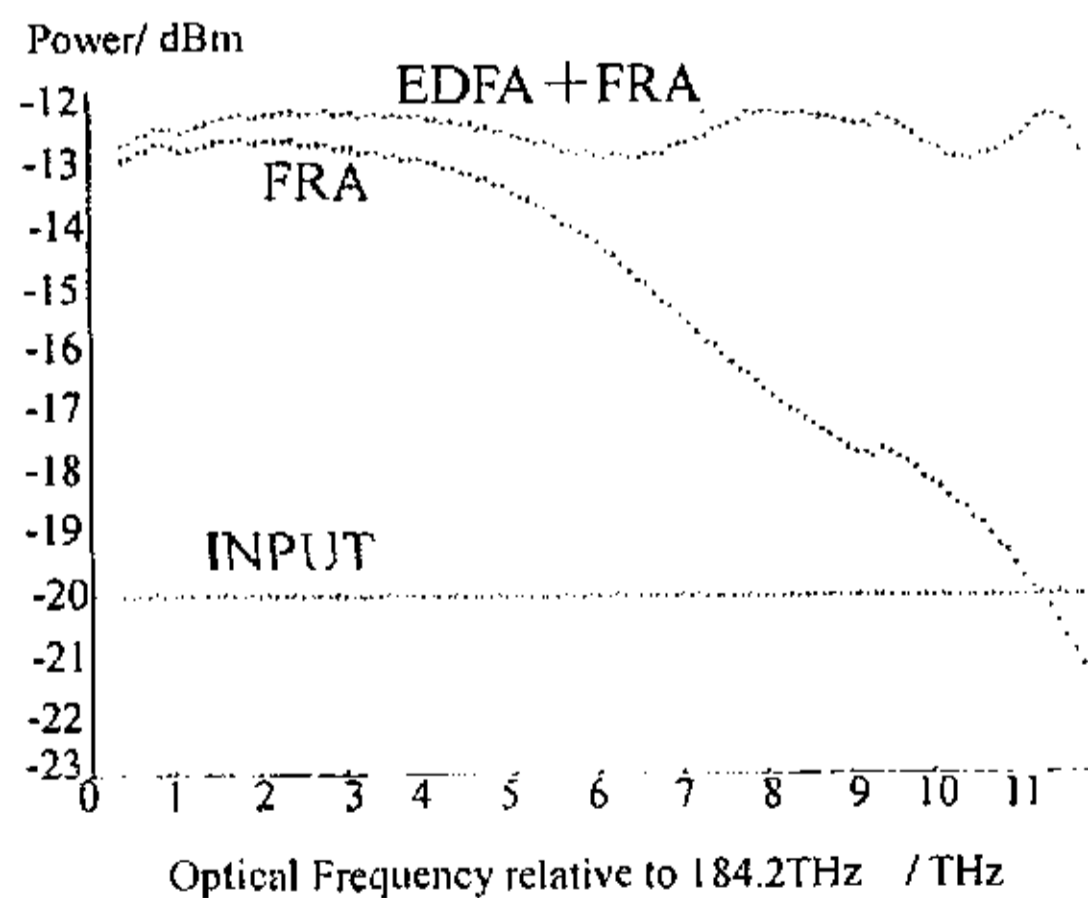


图 5-12 信号光注入 HFA 以前、经过 FRA 放大后以及经过 EDFA 后的光功率谱

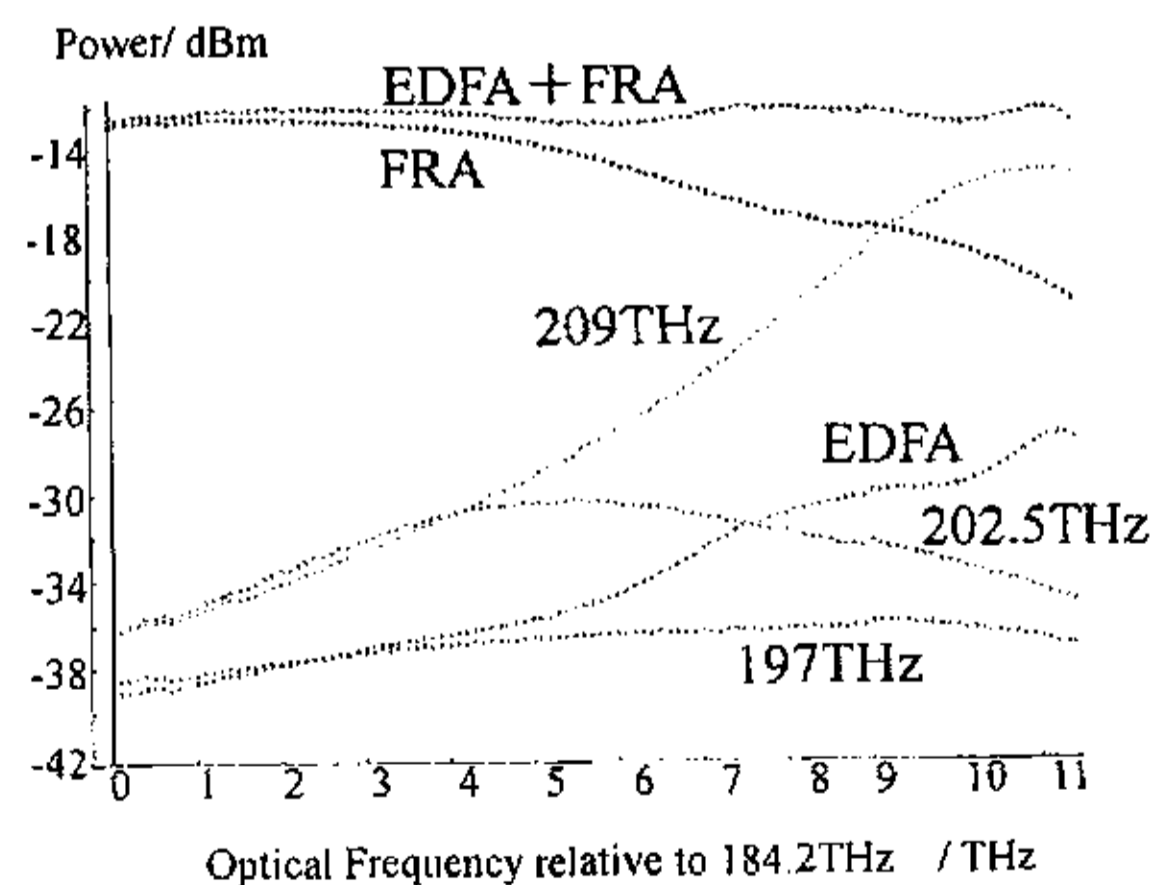


图 5-13 EDFA 单独工作以及 FRA 3 个泵分别单独作用时的输出功率谱

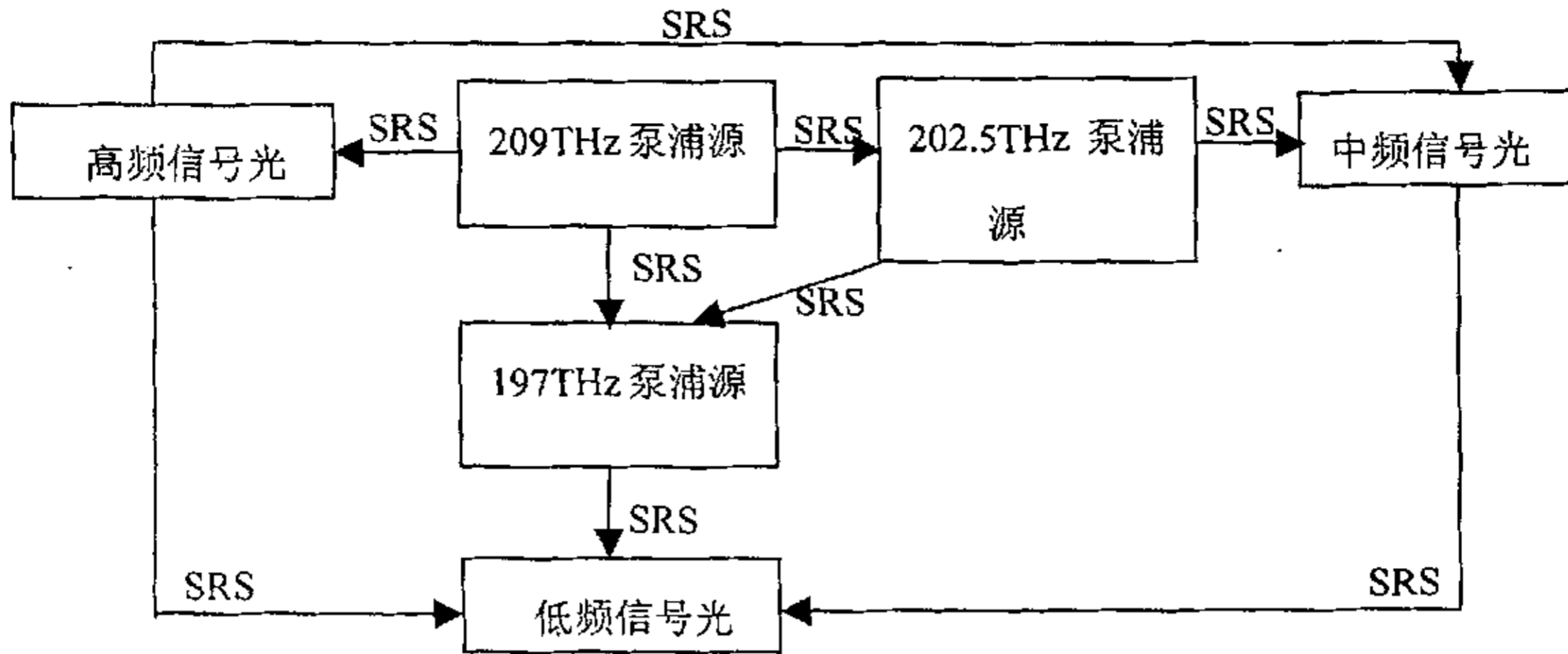


图 5-14 放大过程中能量转移以及增益峰形成示意图（图中忽略了光纤损耗的影响）

图 5-15 给出了 115 路 WDM 信号经 HFA 放大后的 OSNR 随信道数变化的关系曲线。该曲线表现出明显的单调递减特性，随着光频率的增加光信噪比下降，整个 115 路 WDM 信号的 OSNR 在 20.5—26.6dB 范围内变化，第一路信道（184.6THz）的光信噪比最高达到 26.6dB，第 115 路信道的 OSNR 最低，但也有 20.5dB。产生这种现象的原因在于瑞利散射强度与光频率的 4 次方成正比，瑞利散射又是 HFA 中主要噪声源之一，因此高频信号光受瑞利散射影响比低频信号光严重得多，光信噪比较低。

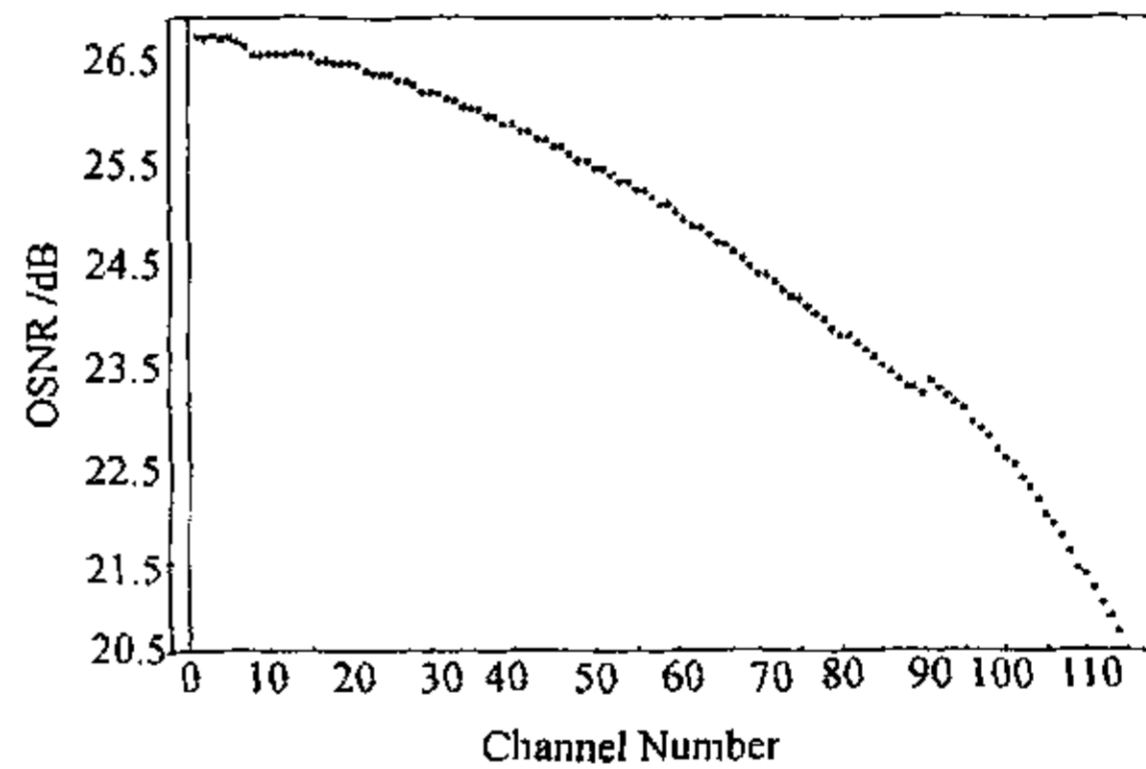


图 5-15 OSNR 随信道数变化的关系曲线

5.4 基于宽带混合光纤放大器的波分复用高速光纤通信系统研究

5.4.1 仿真试验系统

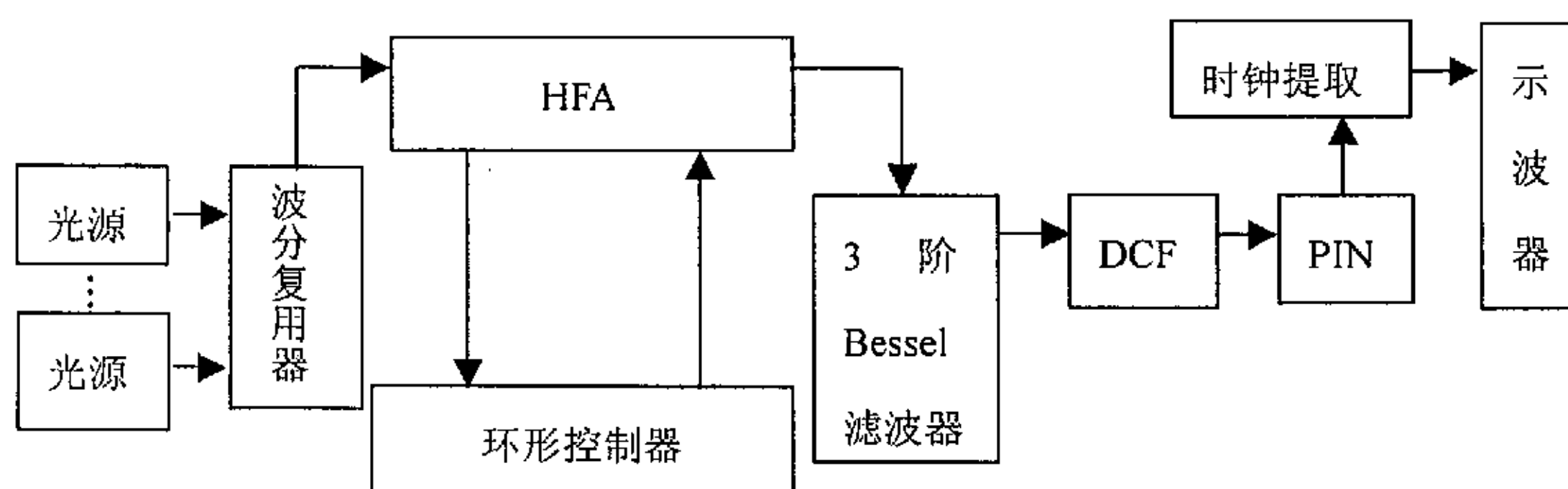


图 5-16 仿真系统模型图

表 5-3 系统的一些关键参数值

第 1 路信道频率	184.6THz	FRA 泵浦频率 (功率)	197THz(15.1mW)
信道间隔	600GHz	FRA 泵浦频率 (功率)	202.5THz(0.18W)
EDFA 长度	2m	FRA 泵浦频率 (功率)	209THz(0.9W)
DCF 非线性系数	$2.6 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$	瑞利后向散射系数	$6 \times 10^{-8}/\text{m}$
复用信道数	20	DCF 有效模场面积	$50 \mu\text{m}^2$
DCF 色散系数	$-90 \times 10^{-6} \text{s}/\text{m}^2$	EDFA 泵浦波长(功率)	980nm(100mW)

试验中用到的仿真系统模型如图 5-16 所示。在该试验中我们采用 20 路信道，每信道采用 7 阶伪随机非归零码，信道速率为 40Gb/s，第一路信道的频率为 184.6THz，信道间隔为 600GHz。20 路信号经波分复用器复用后，注入 HFA，在环形控制器的控制下，光信号经过 6 个放大级后输出，经 3 阶 Bessel 滤波器后提取出测试信道（在该试验中为第 20 信道），再经 DCF 进行色散和色散斜率补偿，光电二极管（PIN）和时钟提取后输出到示波器上进行观测。HFA 在光信号频谱范围内具有平坦增益（增益起伏小于 1dB），其结构框图如图 5-11 所示。FRA 采用三个泵浦源后向泵浦以减小噪声，EDFA 也采用后向泵浦方式提高泵浦效率。系统的其余参数如表 5-3 所示。在以下仿真试验过程中，所有与

信号频率有关的参数值均是 196THz 处的值。在接下来的仿真试验中，我们将研究表 5-4 中所列的各参数对 BER 的影响，在我们研究某一参数与 BER 的关系时，其余各参数保持不变。

表 5-4 仿真试验中将要研究的参数

FRA 色散系数	$16 \times 10^{-6} \text{s/m}^2$	Bessel 滤波器带宽	50GHz
FRA 色散斜率	80s/m^3	FRA 长度	80km
FRA 有效模场面积	$80 \mu\text{m}^2$	每信道入纤功率	-13dBm
FRA 非线性系数	$3.2 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$	HFA 放大级数	6

5.4.2 抑制噪声的有效途径——光滤波器

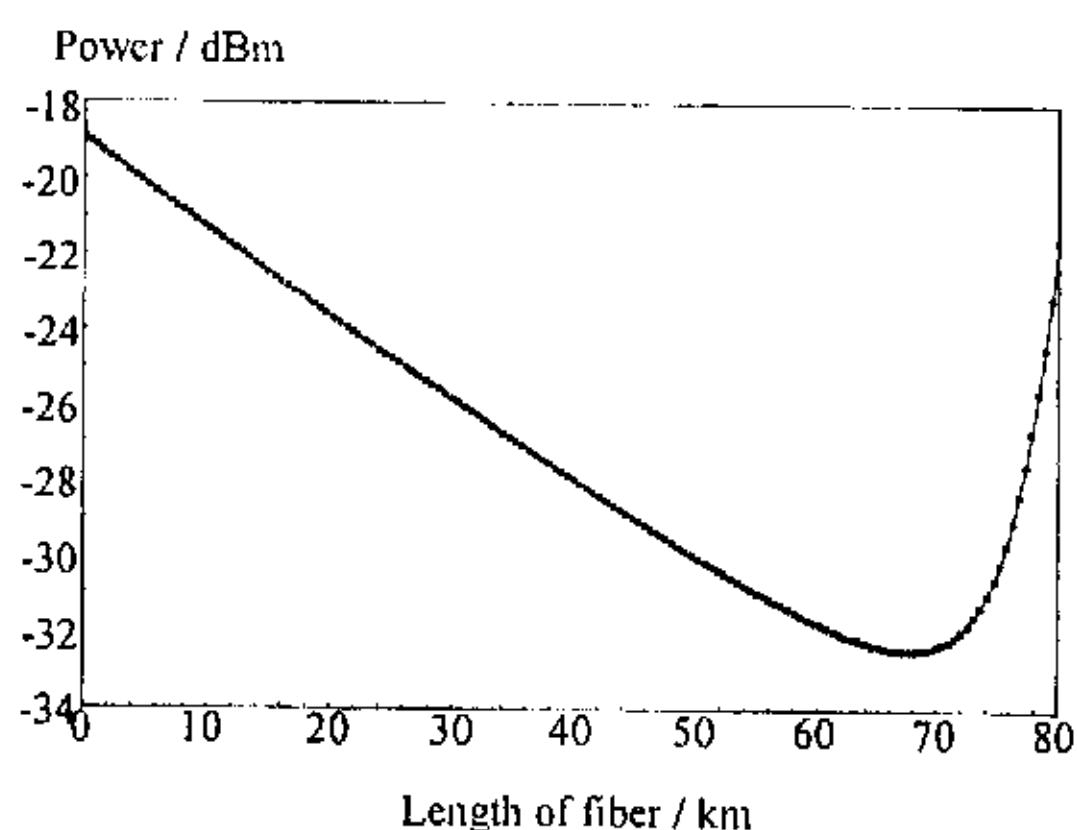


图 5-17 未加入光滤波器时噪声随 FRA 光纤长度的变化关系

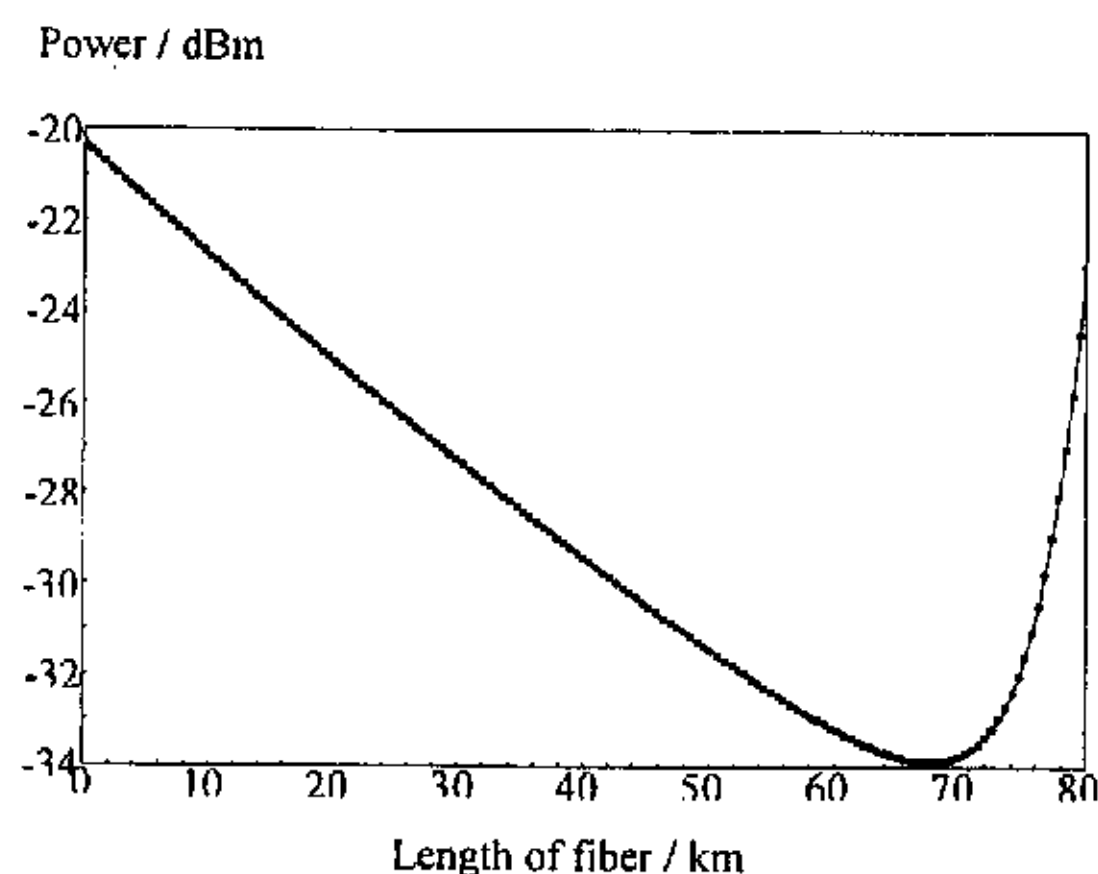


图 5-18 加入光滤波器后噪声随 FRA 光纤长度的变化关系

从 HFA 的结构框图中我们可以看到，强泵浦光注入 FRA 必然在其中形成强烈的后向瑞利散射，由于是后向泵浦，所以瑞利散射光与信号光同方向，光隔离器 2 并不能阻挡该瑞利散射光，该散射光经过 EDFA 时，既可能引起 EDFA 增益饱和，又可能影响下一级 HFA 的噪声特性，还可能在 FRA 中形成强的双重瑞利散射噪声。因此如何抑制泵浦瑞利散射光成为降低系统 BER 的关键。我

们可以通过在光隔离器 2 的后面接一个光滤波器的办法抑制该散射光。由于频率为 197THz 的泵浦瑞利散射光离信号频带很近，因此为了有效抑制该散射光，我们选用梯形滤波器，它的滤波中心频率为 190.3THz，通带带宽为 13.2THz，截止带宽为 13.25THz，这样的一个梯形滤波器的斜边已经非常陡峭，足以抑制频率为 197THz 的泵浦瑞利散射光。图 5-17 给出了在未加入光滤波器时信号经过第 6 级 FRA 时噪声随 FRA 光纤长度的变化关系，图 5-18 给出了加入光滤波器后信号经过第 6 级 FRA 时噪声随 FRA 光纤长度的变化关系，从图 5-17 和图 5-18 中我们可以清楚地看出，两种情况下前向噪声功率随 FRA 光纤长度的变化关系基本相似，由于光滤波器的加入抑制了泵浦瑞利散射光，使得噪声功率降低了约 1.5dBm。

5.4.3 仿真试验结果及其分析

图 5-19 给出了 $-\lg(\text{BER})$ 随 FRA 色散系数 (DSMF) 的变化关系曲线。从图中可知 BER 随 FRA 色散系数呈波浪式渐进变化，虽然变化过程中略有起伏，但总体还是呈增加的趋势。因此我们在设计光纤时应在工艺要求的范围内尽量减小光纤的色散系数，从而达到更好的系统性能。

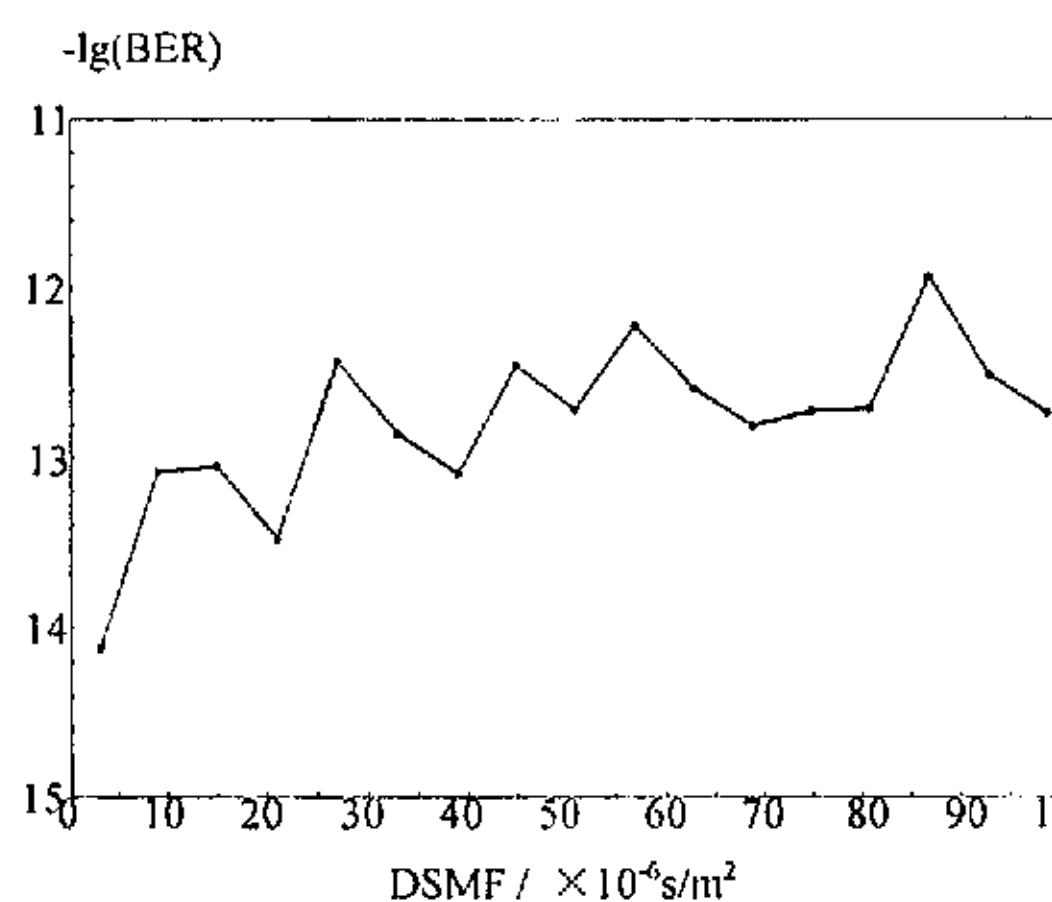


图 5-19 $-\lg(\text{BER})$ 随 DSMF 的变化关系曲线

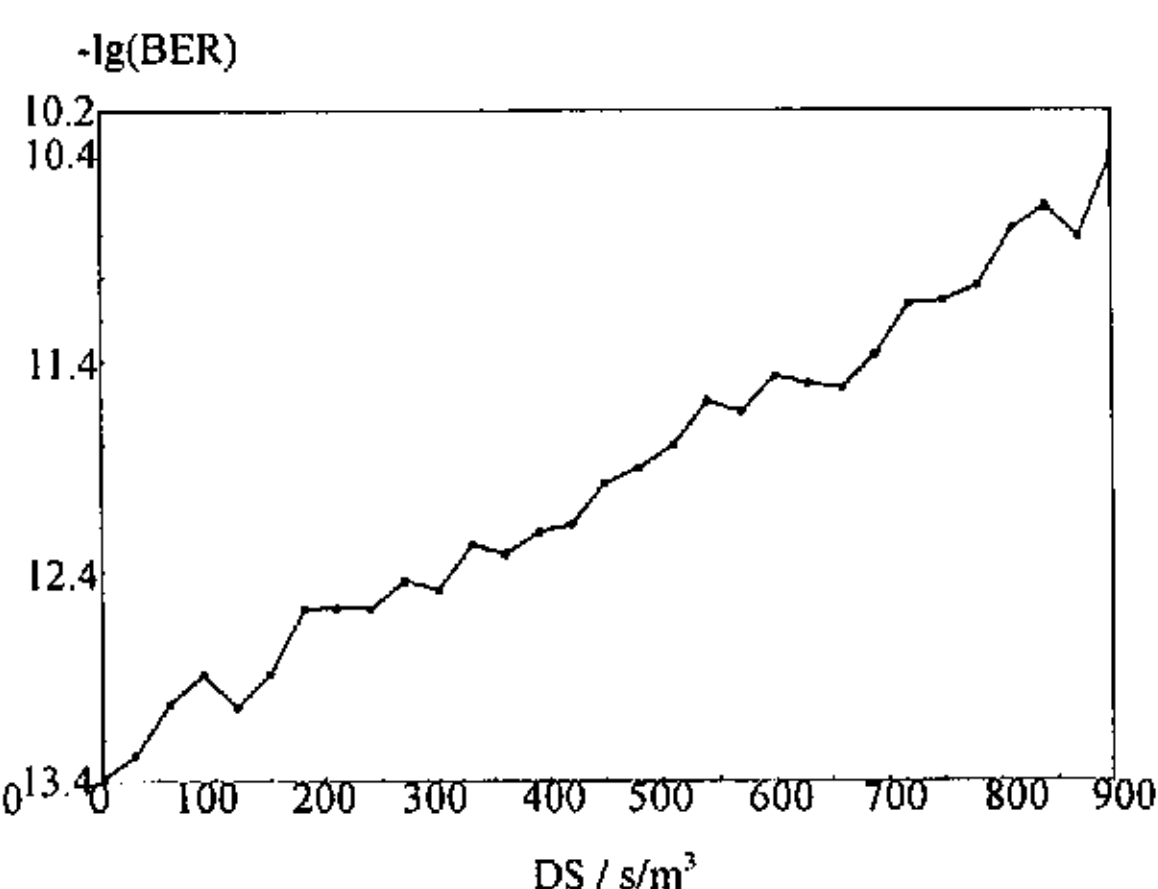


图 5-20 $-\lg(\text{BER})$ 随 DS 的变化关系曲线

图 5-20 描述了 $-\lg(\text{BER})$ 随 FRA 色散斜率 (DS) 的变化关系曲线。从图中可以看出系统 BER 随 FRA 的色散斜率几乎呈单调上升变化趋势。从中可以得出结论：三阶色散对该系统的 BER 影响较大，即使采用 DCF 进行三阶色散的完全补偿也不能完全抵消其对 BER 的影响。因此在设计光纤时应尽量将其色

散斜率设计得小一些。

图 5-21 描述了 $-\lg(\text{BER})$ 随 FRA 非线性系数 (N) 的变化关系曲线。从图中可以看出, 由于较小的非线性系数, 受激喇曼过程难于形成, 因而信号得不到放大, 光信噪比很低, 致使系统误码率很大; 当非线性系数过大时, 交叉相位调制、自相位调制以及四波混频等非线性效应变得严重起来, 直接导致误码率变大。总的看来, 非线性系数在 $27\text{--}33 \times 10^{-21} \text{m}^2/\text{W}$ 范围内变化时, 系统仍保持较低的 BER ($< 10^{-12}$), 因此, 设计光纤时还是应该将非线性系数设计在该范围内。

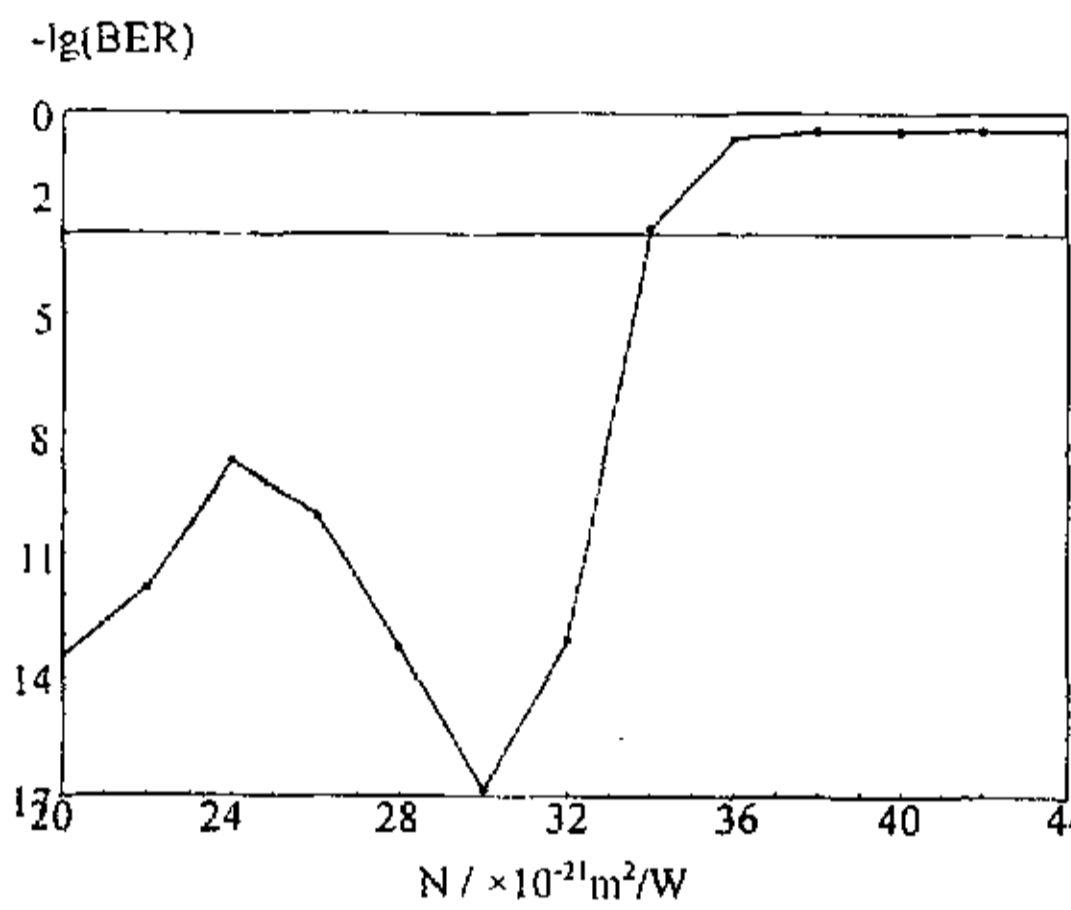


图 5-21 $-\lg(\text{BER})$ 随 N 的变化关系曲线

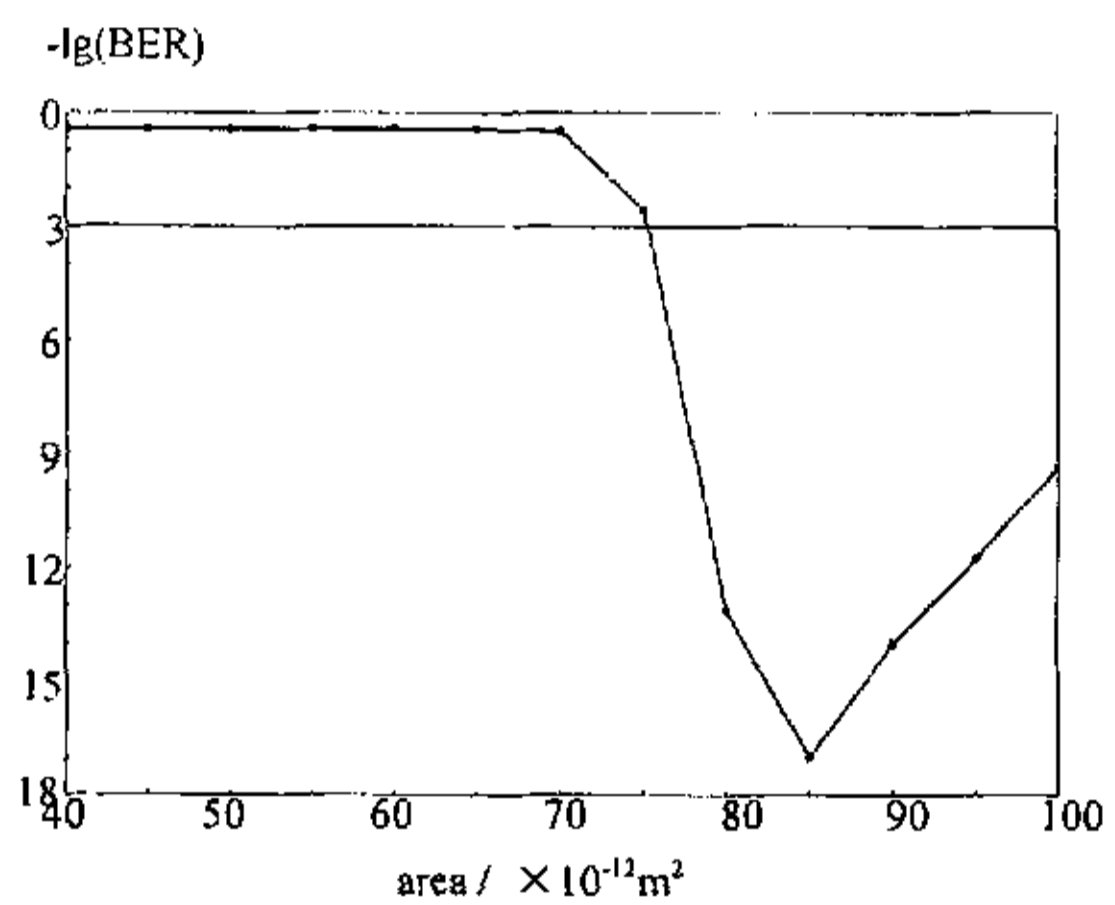


图 5-22 $-\lg(\text{BER})$ 随 area 的变化关系曲线

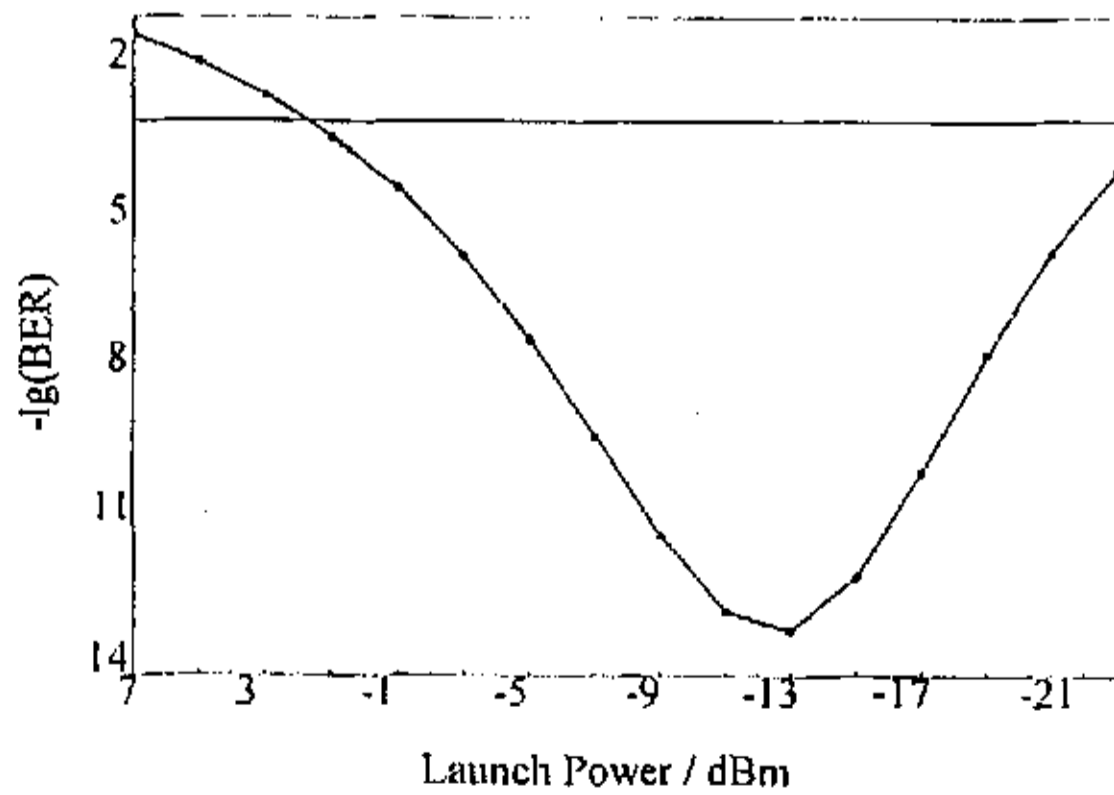


图 5-23 $-\lg(\text{BER})$ 随 Launch Power 的变化关系曲线

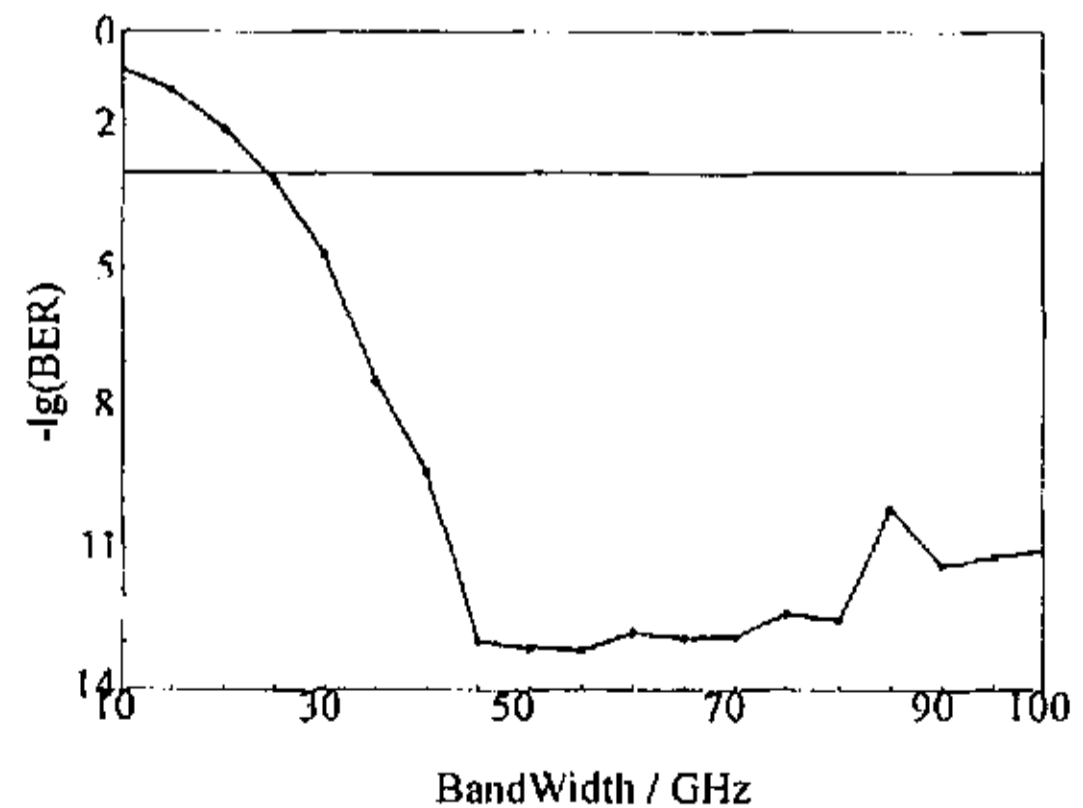


图 5-24 $-\lg(\text{BER})$ 随 BandWidth 的变化关系曲线

图 5-22 给出了 $-\lg(\text{BER})$ 随 FRA 有效模场面积 (area) 的变化关系曲线。从图中可以看出, FRA 有效模场面积较大时, 受激喇曼过程效率变低, 信号得不到充分放大, 到达接收端时信号已经淹没在噪声中难于提取, 因此误码率很高, 随着有效模场面积的减小, 喇曼效率变高, 但当面积继续减小时, 其它的非线性过程严重起来, 因而影响了系统性能的进一步提高, 系统误码率变大。BER 在有效模场面积为 $85 \mu\text{m}^2$ 时达到最小值。

图 5-23 给出了 $-\lg(\text{BER})$ 随每信道入纤功率 (Launch Power) 的变化关系曲线。从图中可以看出, 入纤功率较小会直接导致接收端光信噪比的恶化, 入纤功率过大将会导致信号的非线性损伤增加, 同样使得系统的性能下降。两种因素的影响有个折中, 在入纤功率为 -13dBm 时整个系统的性能达到最佳。

图 5-24 给出了 $-\lg(\text{BER})$ 随 Bessel 滤波器带宽 (BandWidth) 的变化关系曲线。从图中可知, 较小的滤波带宽会直接影响信号的接收质量, 而较大的接收带宽又无法滤除信号频带以外的噪声, 致使信噪比降低。因此合理的选择接收带宽直接影响着系统的性能。由图可知, 对于这样的一个滤波器带宽设定在 $45\text{—}80\text{GHz}$ 较好。

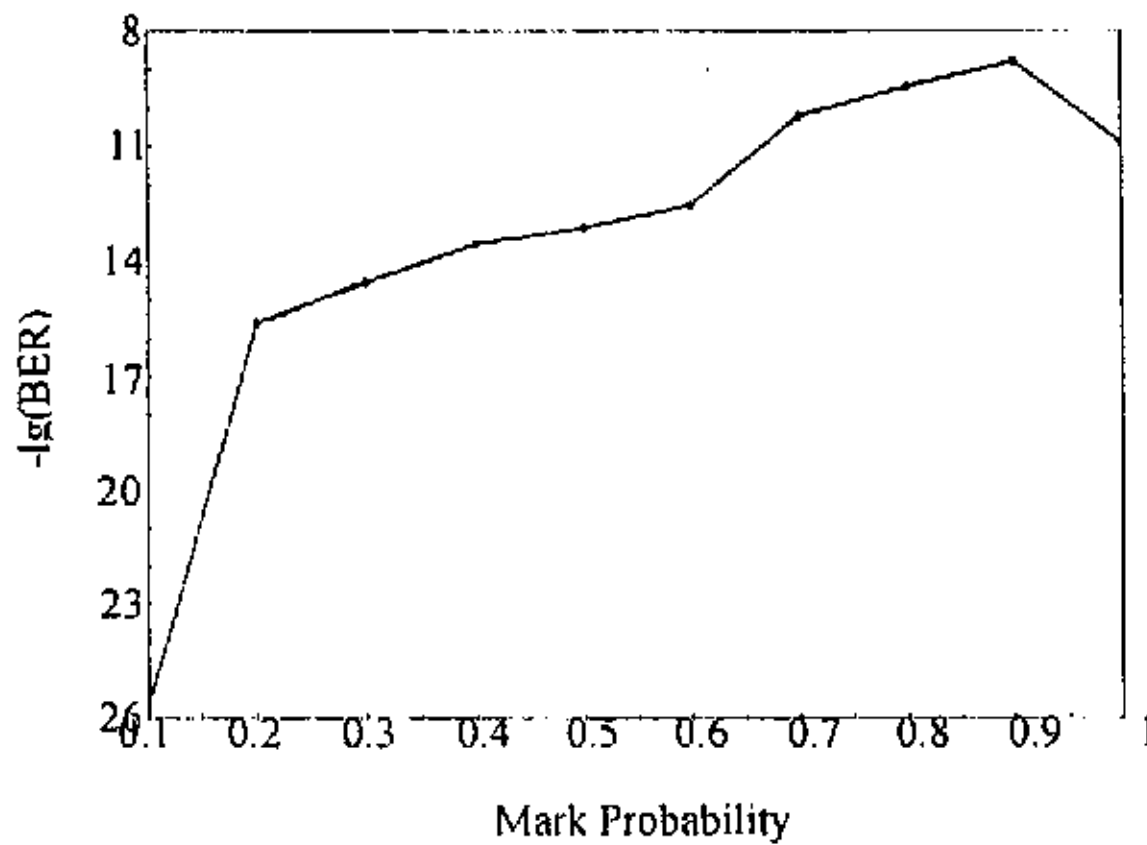


图 5-25 1 码出现概率与 $-\lg(\text{BER})$ 之间的关系

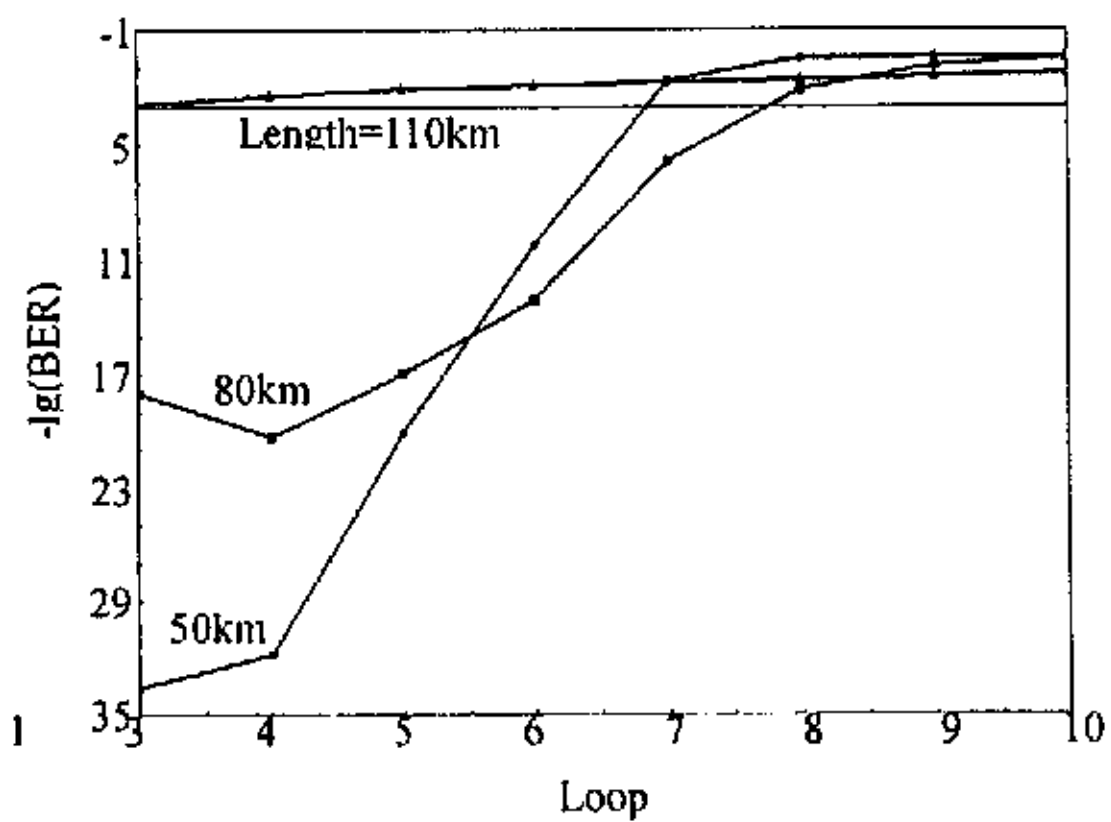


图 5-26 不同 FRA 长度下放大器级数与 $-\lg(\text{BER})$ 的关系曲线

我们还研究了非归零码中 1 码出现概率 (Mark Probability) 与 $-\lg(\text{BER})$ 之间的关系, 图 5-25 给出了两者的关系曲线。从图中可以看出, 1 码概率在 $0.1\text{—}0.9$ 范围内变化时, 系统的 BER 随 1 码出现概率的增加而单调增加。产生这种现象的原因显而易见, 从概率上说 1 码越少色散和非线性损伤的容限越大, 因此在 $0.1\text{—}0.5$ 之间 BER 保持较小值, 随着 1 码出现概率的增加, 随后由于 1 码增多信号谱宽变窄, 频谱展宽容限变大, 因此在 $0.9\text{—}1$ 之间, BER 略微下降, 在 1

码概率为 1 时, 此时全部传输的都是 1 码, 接收端判错的几率很小, 因此 BER 变小, 但此时通信已全无意义。

图 5-26 给出了不同 FRA 长度下放大器级数(Loop)与 $-\lg(\text{BER})$ 的变化关系曲线。从图中可以看到, 对于泵浦功率和频率一定时, 经过相同的放大级数, 并不是光中继距离越小越好, 当光中继距离较大时, 由于信号损耗较大因此 OSNR 降得很低, 并且此时后向瑞利散射噪声也相当大致使系统性能降低, 当光中继距离较小时, 后向瑞利散射噪声减小, 信号获得较高的增益, 因此信号功率很强致使系统的非线性损伤增加, 降低了系统的性能。因此对于一定的泵浦功率和频率, 存在一个最佳的光中继距离。

5.5 本章小结

在本章第一节中我们用增益起伏 1dB 作为增益平坦的标准, 介绍了一种宽带混合光纤放大器的设计方法: 由于 EDFA 的增益谱在 193.1THz 和 195THz 之间呈上升趋势, 只要适当设计 FRA 的泵浦频率和泵浦功率使其增益谱在 193.1THz 和 195THz 之间呈下降趋势, 并且使上升幅度与下降幅度相当, 就有可能设计出指定波段内的增益平坦的 HFA。该方法先确定 EDFA 的泵浦功率和光纤长度, 然后对 FRA 的特性进行了分析, 设计出 FRA 的光纤长度, 最后利用 FRA 泵浦功率直接决定 HFA 的增益和带宽这一特性确定 FRA 的泵浦功率。在接下来一节中设计了一个平坦带宽为 11.4THz, 增益达到 7.5dB, 覆盖整个 C+L 波段的宽带 HFA, 该 HFA 由一个后向泵浦的分布式 FRA 和一个后向泵浦的集总式 EDFA 组成, 在整个 HFA 设计中没有使用任何的增益均衡器。我们对该 C+L 波段的宽带混合光纤放大器增益特性和噪声特性进行了仿真研究, 并对其在放大过程中泵浦光与信号光, 信号光与信号光, 泵浦光与泵浦光之间的相互作用和能量转移进行了仿真研究, 同时对宽带混合光纤放大器的噪声特性也进行了研究。在第三节中, 利用 VPITransmissionmaker 仿真试验平台对基于宽带混合光纤放大器的 WDM 高速光纤通信系统进行了较详细地研究, 先介绍了一种利用光滤波器进行噪声抑制的方法, 通过仿真试验研究, 可以获得约 1.5dBm 的噪声功率抑制, 在此基础上, 得到了光纤喇曼放大器的色散系数、色散斜率、有效模场面积、非线性系数、入纤功率、Bessel 滤波器带宽, 放大级数以及光纤喇曼放大器长度对基于 HFA 高速光纤通信系统误码率的影响关系。研究表明, 在 40Gb/s WDM 高速光纤通信系统中, 通过适当选择光纤喇曼放大器的色散斜率、色散系数、有效模场面积、非线性系数、以及光纤长度、入纤功率、Bessel 滤波器带宽, 基于 HFA 的长距离光纤通信系统是能够实现的。

第六章 全文总结

光纤通信系统正朝着高速、宽带、大容量、长距离的方向迈进，光纤通信网路正朝着灵活，对业务透明的智能光网络演变。在这样一种发展趋势下，光纤中传输的波长数目日益增多，每波长的信号比特率越来越高，信道间隔越来越小，这些变化都直接导致了光纤通信系统中的非线性损伤的增加。以前传统的 EDFA 集总式放大方式已经不能适应光纤通信系统的发展，分布式光纤喇曼放大器和混合光纤放大器逐步在光纤通信系统中得到应用，分布式光纤喇曼放大器由于其自身固有的全波段放大特性和利用传输光纤做在线放大的优点，能很好的开发整个光纤低损耗区的带宽资源，增加总的传输带宽。信号光经过 FRA 时信号实现平稳放大，在 FRA 中光功率不会像在 EDFA 中那样出现跃变，极大的抑制了光纤非线性效应的产生，降低了系统的非线性损伤，有利于实现光纤通信系统的高速、宽带、大容量、长距离传输。由 FRA 和 EDFA 组成的 HFA 是光纤通信系统升级换代最理想的光纤放大器。HFA 不仅能够实现 EDFA 增益谱平坦，而且能够增加无电再生中继距离，同时减小光信号的非线性损伤，延长传输距离，提高光纤通信系统的传输性能。由于 HFA 设计简单，在系统升级换代时只需在 EDFA 前加入几个泵浦激光器就能实现 HFA，这使得系统升级时费用大大降低，而且无需再重建网络，使系统的再生性大大加强。因此 FRA 和 HFA 在光纤通信系统中的应用得到了越来越多的重视，吸引了越来越多的人从事这方面的研究工作。

本文第一章中首先介绍了光纤放大器的历史背景以及发展过程，然后对半导体激光放大器，掺杂光纤放大器以及受激散射光纤放大器各自特点及其发展进行了一个简要的介绍，接下来综述了光纤喇曼放大器较其它几种光纤放大器的优势，然后对 EDFA 和光纤喇曼放大器在光纤通信系统中的应用进行了仿真比较。结果表明，无论是在单信道光纤通信系统中还是在 WDM 光纤通信系统中，FRA 与 EDFA 相比都有比较明显的优势。最后综述了光纤放大器的发展方向并指出了论文所要研究的内容。

第二章首先介绍了光纤喇曼放大器的原理，在此基础上搭建了本文仿真 FRA 的理论模型，同时建立了功率分析和模场分析模型，并对以后仿真中将要用到的喇曼增益谱曲线，光纤损耗曲线以及色散曲线进行了拟合，最后介绍了一些光子设计自动化仿真软件和本文主要使用的仿真工具——VPITransmissionmaker。

第三章对光纤喇曼放大器在单信道高速光纤通信系统中的应用进行了研

究。首先介绍了研究该内容的背景，然后对目前比较常用的两类光纤喇曼放大器在单信道高速光纤通信系统中的应用进行了研究，在 VPITransmissionmaker 上对比例系数，泵浦功率，FRA 有效模场面积，FRA 色散系数，FRA 非线性系数以及入纤功率对系统 BER 的影响进行了仿真研究，在此基础上对各自系统进行了优化设计，最后对两类 FRA 进行了比较。

第四章的研究内容为宽带光纤喇曼放大器的设计及其在波分复用高速光纤通信系统中的应用。首先介绍了研究该内容的背景，然后对一种快速宽带光纤喇曼放大器的设计方法进行了介绍，通过该方法可以快速设计出任一波段的增益可控制的宽带 FRA，接下来对宽带光纤喇曼放大器特性进行了仿真研究，得到了泵浦光与信号光，信号光与信号光，泵浦光与泵浦光之间能量转移的一些有用的结论，并对宽带 FRA 的噪声特性进行了研究；最后在 VPITransmissionmaker 仿真试验平台上，对基于宽带光纤喇曼放大器的 WDM 高速光纤通信系统进行了较详细地研究，得到了色散补偿光纤的配置、光纤喇曼放大器的色散系数、色散斜率、有效模场面积、非线性系数、后向瑞利散射系数、入纤功率、Bessel 滤波器带宽以及光纤喇曼放大器长度对系统误码率的影响关系，同时对严重影响长距离光纤传输系统性能的后向瑞利散射噪声对光信噪比及误码率的影响也作了较详细地研究。研究结果表明，通过合理设计光纤参数能够实现宽带长距离传输。

第五章对宽带 HFA 及其在 WDM 高速光纤通信系统中的应用进行了研究。首先介绍了研究该内容的背景，然后介绍了一种 HFA 的设计方法，接下来设计了一个平坦带宽为 11.4THz，增益达到 7.5dB，覆盖整个 C+L 波段的宽带 HFA，该 HFA 由一个后向泵浦的分布式 FRA 和一个后向泵浦的集总式 EDFA 组成，在整个 HFA 设计中没有使用任何的增益均衡器。我们对该 C+L 波段的宽带混合光纤放大器增益特性和噪声特性进行了仿真研究。最后提出了一种用光滤波器抑制噪声的有效方法，并将该方法应用于波分复用高速光纤通信系统中，在 VPITransmissionmaker 仿真试验平台上，对入纤功率、光纤喇曼放大器的色散系数、色散斜率、有效模场面积、非线性系数、Bessel 滤波器带宽、光纤喇曼放大器长度以及非归零码中 1 码出现的概率对系统误码率的影响进行了仿真研究。

通过本文的研究，可以得到以下研究结果：

- 1) 基于 DCF 的 FRA 有效模场面积较小，具有较高的泵浦效率，在相同情况下所需泵浦功率比基于传输光纤的 FRA 所需的泵浦功率小，其系统传输距离没有基于传输光纤的 FRA 的系统长，但却能保持比基于传输光纤的 FRA 的

系统更小的误码率；基于传输光纤的 FRA 因为有效模场面积较大，需要较大的泵浦功率，然而在多加一个 FRA 作为代价的情况下其系统传输距离可以比基于 DCF 的 FRA 的系统长 70km，但它的误码率要比基于 DCF 的 FRA 的系统高；基于 DCF 的 FRA 的系统所要求的入纤功率相对较大，而基于传输光纤的 FRA 的系统所要求的入纤功率则相对较小，因而在设计实际系统时可以根据具体情况适当选择。

- 2) 利用宽带光纤喇曼放大器中泵浦与泵浦之间能量的转移，可以找到一种宽带光纤喇曼放大器的快速设计方法，该方法分两步进行：第一步先将低频泵浦信号去掉，通过对中频泵浦信号的频率和光功率进行搜索，可以使两个边缘的信号光功率的平均值等于中间光信号频率处的功率值；第二步加入低频泵浦信号，巧妙利用 SRS 过程中泵浦光之间的能量转移，可以设计出指定波段的宽带光纤喇曼放大器，同时利用不同的泵浦源在增益谱中所起作用的不同，可以找到一种控制 FRA 增益的方法：将中频和高频泵浦源的功率降低同等倍数，通过调节低频泵浦源的功率值可以得到增益起伏小于 1dB 的不同增益值。
- 3) DCF 配置、FRA 的色散系数、色散斜率、有效模场面积、非线性系数、后向瑞利散射系数、入纤功率、Bessel 滤波器带宽以及 FRA 长度对基于光纤喇曼放大器的高速光纤通信系统的 BER 有很大影响，后向瑞利散射噪声是严重制约长距离光纤传输系统性能的一个重要因素，它对光信噪比恶化起到了加速的作用。经研究，在 40Gb/sWDM 光纤传输系统中，通过合理配置 DCF，适当减小 FRA 的色散系数，增加色散斜率，提高非线性系数并且选择合适的入纤功率，FRA 有效模场面积和接收机带宽，宽带长距离传输是能够实现的。
- 4) 利用 EDFA 的增益谱在 193.1THz 和 195THz 之间呈上升趋势，只要适当设计 FRA 的泵浦频率和泵浦功率使其增益谱在 193.1THz 和 195THz 之间呈下降趋势，并且使两者的上升幅度与下降幅度相当，就有可能设计出指定波段内的增益平坦的 HFA。
- 5) 光滤波器能够有效地抑制喇曼泵浦后向瑞利散射光，通过仿真试验研究，可以获得约 1.5dBm 的噪声功率抑制。光纤喇曼放大器的色散系数、色散斜率、有效模场面积、非线性系数、入纤功率、Bessel 滤波器带宽，放大级数以及光纤喇曼放大器长度对基于 HFA 高速光纤通信系统误码率有极大的影响，通过合理配置以上关键参数，基于 HFA 的宽带长距离光纤传输是可以实现的。

本文结合理论分析和数字仿真，对 FRA 和 HFA 的设计、特性及其对高速光纤通信系统的性能影响进行了较广泛的研究，得出了一些对大容量、宽带、长距离波分复用系统设计具有参考意义的结论。

当然，本文中也可能存在一些不足之处，很多方面有待于进一步深入研究和完善。如在研究和设计放大器时，仅仅以增益为主要研究方面，忽视了噪声特性以及输出功率等因素；在研究光纤通信系统时，将主要的研究重点放在了光放大器的参数对系统性能的影响上，而忽略了其他因素对系统 BER 的影响。另外对放大器的瞬时特性也研究太少，同时在几乎所有的仿真中都没有考虑四阶以上色散以及偏振模色散 (PMD)，在高速光纤通信系统中，这些效应对系统的影响也是明显的。

同时，本文所进行的工作都集中在点对点的波分复用系统。随着光网络的大量铺设，信号将以全光的形式通过网络的中节点，对信号在网络中受到的损伤进行深入的研究是非常必要的。这时将会考虑到各种光网络中特有的损伤对光放大器的影响，如在中间节点由于光开关的隔离度不为无限大带来的同频和异频串扰对光放大器的影响等等，这些问题都将在将来的工作中进行更深入的研究。

参 考 文 献

1. 纪越峰, 波分复用系统. 北京: 北京邮电大学出版社, 1999 年
2. 顾毓仪, 全光通信网. 北京: 北京邮电大学出版社, 1999 年
3. Chidgey P. Multi-Wavelength Transport Networks, IEEE Comm.Mag, 1994, 23: 28~35
4. 杨祥林. 光纤放大器与全光通信技术. 大自然探索, 1992, 11 (1): 8
5. 张宏斌, 邱昆, 周东. 波分复用光纤通信技术. 电子科技大学学报, 2000, 29 (4): 337~340
6. 张宏斌, 邱昆, 周东. 光纤传输特性及其在光网中的应用设计分析. 电子科技大学学报, 2000, 29 (4): 342~346
7. 杨祥林. 光纤通信系统. 北京: 国防工业出版社, 2000
8. Chraplyvy A R. Impact of Nonlinearities on lightwave systems. Optical and Photonics News, 1994, (5): 16~21
9. Chraplyvy A R. Limitations of lightwave communications imposed by optical fiber nonlinearities. Journal of Lightwave Technology, 1990, 8 (10): 1548~1557
10. Shibata Nori, Nosu Kiyoshi, Iwashita Katsushi, et al. Transmission limitations due to fiber nonlinearities in optical FDM systems. IEEE Journal of Select Areas Communication, 1990, 8 (6): 1068~1077
11. Kyo Inoue, Hiromu Toba, Kazuhiro Oda. Influence of fiber four-wave mixing on multichannel FSK direct detection transmission systems. Journal of Lightwave Technology, 1992, 10 (3): 350~360
12. P. S. Henry, R. A. Linke and A. H. Gnanck. Introduction to lightwave systems in optical fiber telecommunications, III. Edited by S. E. Miller and I. P. Kaminow. Academic Press, New York: 1988
13. H. Taga et. al.. 10Gb/s, 9000km IM-DD transmission experiment using 274 Er-doped fiber amplifiers. OFC'93, PD1, OSA, Washington: DC. 1993
14. 杨祥林. 全光接力通信技术. 东南大学学报, 1992, 22 (3): 38~49
15. N. A. Olsson. Lightwave systems with optical amplifiers. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1989, 7 (7): 1071
16. J. A. Arnaud. Enhancement of optical receiver sensitivities by amplification of the carrier. IEEE Journal of Quantum Electron, 1968, 4 (11): 898

17. T.Ito. 6.4Tb/s(160×40Gb/s)WDM transmission experiment with 0.8bit/s/Hz spectral efficiency, ECOC'2000, PD1.1
18. Farbert et al. 7Tb/s(176×40Gb/s)bi-directional interleaved transmission with 50GHz channel spacing, ECOC'2000, PD1.3
19. Fariborz Mousavi Madani. Design Theory of Long-Distance WDM Dispersion-Managed Transmission System. IEEE Journal of Lightwave Technology, 17 (8): 1326~1335
20. Leping Wei, Yi Chen, Wong Gerald G. The evolution of China's optical fiber networks. Bell Labs Tech. J, 1999: 125~144
21. 唐明光. 从 ECOC'94 看光通信发展. 电子科技大学学报, 1994, 23 (增刊): 35~40
22. Green Paul E. Optical networking update. IEEE Journal of Select Areas Communication, 1996, 14 (5): 764~779
23. 原荣. 光纤通信网络. 北京: 电子工业出版社, 1999
24. 张涛, 邱昆. 一种基于波分复用的 ATM 光交换结构. 电子科技大学学报, 1998, 27 (4): 371~374
25. 胡明, 李乐民. 一种预约式波分复用网信道分配方法. 电子科技大学学报, 1998, 27 (3): 256~260
26. Watanabe Atsushi. Optical path cross-connect system architecture suitable for large scale expansion. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14 (10): 2162~2172
27. SATORU. Network architecture and management concepts for transport networks. IEEE Network Operations and Management Symposium, 1996: 1~11
28. Hill G R. A transport network layer based on optical network element. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11 (516): 667~676
29. Charles A B. Is there an emerging consensus on WDM networking. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14 (16): 936~941
30. Wu T H. Fiber network service survivability. MA: Artech House, 1992
31. Sosnosky J, Wu T H. SONET ring application for survivable fiber loop networks. IEEE Communication Mag, 1991, 29(6): 51~58
32. Wu T H., Lau R C. A class of self-healing ring architectures for SONET network applications. IEEE GLOBECOM'90, 1990, 403(2):1~8
33. 张成良, 李允博. WDM 环网技术和光联网发展, 电信技术, 1999, 10: 10~12
34. 韦乐平. 光同步数字传送网. 北京: 人民邮电出版社, 1998
35. 李乐民. 宽带光纤通信网. 电子科技大学学报, 1992, 21 (增刊): 1~11

36. Janice Hedging, Jocelyn Nee. WDM all-optical networks. EE228A Project Report, 1996
37. Ramamuthy Byrav. Wavelength conversion in WDM networking. IEEE JSAC, 1998, 6(9): 312~321
38. Doverspike R D, Philips S, Westbrook J. Future transport network architectures. IEEE Comm Mag, 1999, 37(8): 44~51
39. Wuttisittikulkij L, O'Mahony M J. Design of a WDM network using a multiple ring approach. Proc. Globecom97, 1997, 16: 1~5
40. Ezhan Karasan, Ender Ayanoglu. Performances of WDM transport networks. IEEE Journal of Select Areas Communication, 1998, 16(7): 1081~1096
41. Stefano Baroni, Polina Bayvel, Gibbens Richard J, et al. Analysis and design of resilient multi-fiber wavelength-routed optical transport networks. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(5): 743~757
42. Ramamurthy S, Biswanath Mukherjee. Survivable WDM mesh networks Part I—Protection. IEEE Proc INFOCOM'99, 1999
43. ITU-T Rec. Types and Characteristics of SDH networks. G: 841, 1998
44. 宫钦, 蔡建新. 光通信中基于 DCS 的分布式自愈功能. 光通信研究, 1998, 5: 5~10
45. T'joens Yves. Performance evaluation of self-healing functionality in ATM networks, the REFORM perspective. Telecom Lab, National Technology University of Athens, Greece, 1998
46. Desurvire E, Simpson J R, Becker P C. High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier. Opt. Lett., 1987, 12(11): 888~890
47. Olshansky R. Noise figure for erbium-doped optical fiber amplifiers. Electron. Lett., 1998, 24(22): 1363~1365
48. Armitage J R. Three-level fiber laser amplifiers: A theoretical model. Appl. Optics, 1998, 27: 4832~4836
49. E. Desurvire, C. R. Giles, J. R. Simpson. Efficient erbium-doped fiber amplifier at 1530nm wavelength with a high output saturation power. Opt. Lett., 1989, 4(22): 1266
50. Islam M.N. Raman amplifiers for telecommunications. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 8(3): 548~559
51. Kikuchi N, Wong K, Uesaka K, et al. Novel in-service wavelength-band upgrade scheme for fiber Raman amplifier. Photonics Technology Letters, 2003, 15(1): 27~29
52. Mori A, Masuda H, Shikano K. Ultra-wide-band tellurite-based fiber Raman amplifier. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(5): 1300~1306

53. Xueming Liu, Hanyi Zhang, Yili Guo. A novel method for Raman amplifier propagation equations. *Photonics Technology Letters*, 2003, 15 (3): 392~394
54. Namiki S, Emori Y. Recent advances in ultra-wideband Raman amplifiers. *Optical Fiber Communication Conference*, 2000, 4: 98~99
55. Fludger C R S, Handerek V, Mears R J. Fundamental noise limits in broadband Raman amplifiers. *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, 2001, 1: MA5-1 -MA5-3
56. Namiki S, Emori Y. Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7 (1): 3~16
57. Seo H S, Oh K, Paek U C. Gain optimization of germanosilicate fiber Raman amplifier and its applications in the compensation of Raman-induced crosstalk among wavelength division multiplexing channels. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37 (9): 1110 ~1116
58. Minhui Yan, Jianping Chen, Wenning Jiang. Automatic design scheme for optical-fiber Raman amplifiers backward-pumped with multiple laser diode pumps. *Photonics Technology Letters*, 2001, 13 (9): 948~950
59. Hong-Seok Seo, Kyunghwan Oh, Un-Chul Paek. Optimization of Raman amplifier using Raman frequency modeling for arbitrary GeO₂ concentration in silica fiber. *Lasers and Electro-Optics, CLEO/Pacific Rim '99*, 1999, 3: 656~657
60. Yam S S-H, An F-T, Hu E S-T, et al. Gain-clamped S-band discrete Raman amplifier. *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, 2002, 385 ~387
61. T. Saito, T. Mukai. Recent progress in semiconductor Laser Amplifiers. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6 (11): 1656
62. J. C. Simon. GaInAsP Semiconductor Laser Amplifiers for Single-mode fiber communication. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5 (9): 1286
63. C. J. Koester, E. Snitzer. Amplification in a fiber Laser. *Appl. Opt.*, 1964, 3: 1182
64. R. J. Mears. Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μm . *Electron. Lett.*, 1987, 23 (19): 1026
65. E. Desurvire. High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier. *Optics Lett.*, 1987, 12 (11): 888
66. E. P. Ippen, R. H. Stolen. Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fibers. *Applied Phys. Lett.*, 1972, 21 (11): 539
67. R. H. Stolen, E. P. Ippen. Raman gain in glass optical waveguides. *Applied Phys.*, 1973, 22 (6): 276
68. Dahan D, Eisenstein G. Numerical comparison between distributed and discrete

- amplification in a point-to-point 40-Gb/s 40-WDM-Based transmission system with three different modulation formats. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20 (3): 379 ~ 388
69. Suzuki H, Taka chio N, Masuda H, et al. 50GHz spaced 32*10Gbit/s DWDM transmission in zero-dispersion region over 640km of DSF with multiwave length distributed Raman amplification. *Electronics Lett.*, 1999, 35(14): 1175~1176
70. Lewis SAE, Chernikov SV, Taylor JR. Triple wavelength pumped silica-fiber Raman amplifiers with 114nm bandwidth. *Electronics Lett.*, 1999, 35(20): 1761~1762
71. Masuda H, Kawai S. Wide-bandand gain-flattened hybrid fiber amplifier consisting of an EDFA and a multiwavelength pumped Ramanamplifier. *Photonics Tech.*, 1999, 11(6): 647~649
72. 胡国锋, 黄 超. 非线性光纤光学. 天津:天津大学出版社, 1992
73. H. Kidor. Pump Interactions in a 100-nm Bandwidth Raman Amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11 (5): 530~532
74. J. Auyeung, A. Yariv. Spontaneous and Stimulated Raman Scattering in Loss Fibers. *IEEE Journal of Quantum Electron.*, 1978, 14 (5): 347
75. R. W. Davies. Output Moment and Photon Statistics in Fiber Raman Amplification. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5 (8): 1068
76. R. H. Stolen, C. Lee, R. K. Raman Response Function of Silica-Core Fibers. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1989, 6 (6): 1159
77. Y. Aoki. Fiber Raman Amplifier Properties for Applications to Long-Distance Optical Communications. *Optical and Quantum Electron.*, 1989, 21 (5): 89
78. N. Edadawa , k. Mochizuki , Y. Iwamoto. Simultaneous Amplification of Wavelength-Division-Multiplexed Signals by a Highly Efficient Fiber Raman Amplifier Pumped by High-Power Semiconductor Lasers. *Electron Lett.*, 1987, 23 (5): 196
79. S. Chi , M. Sikao. Bidirectional Optical Fiber Transmission System Using Raman Amplification. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6 (2): 312
80. Y. Aoki. Properties of Fiber Raman Amplifier and Their Application to Digital Optical Communications Systems. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 6 (7): 1225
81. G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*. Wiley-Interscience, New York: 1984
82. Morita, K Tanaka, N Edagawa, M Suzuki. 40Gbit/s single-channel transmission over standard single-mode fiber using distributed Raman amplification. *Electronics Letters*, 2000, 36(25): 2084~2085
83. M P Belanger, D Fluet, M Verreault. 40Gbps Optical Transport System, do Carriers need

- it. OFC2001, Anaheim, CA, USA, 2001, 3: WS2-1 -WS2-3
84. A F Evans, J Grochocinski, A Rahman, C Reynolds, M Vasilyev. Distributed amplification: how Raman gain impacts other fiber nonlinearities. OFC2001, Anaheim, CA, USA, 2001, 1: MA7-1 -MA7-3
 85. H Kidorf, K Rottwitt, M Ma, E Rabarijaona. Pump interactions in a 100nm bandwidth Raman amplifier. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11: 530~532
 86. I Morita, K Tanaka, N Edagawa. Benefit of Raman Amplification in ultra-long-distance 40Gbit/s WDM transmission. OFC2001, Anaheim, CA, USA, 2001, 2: TuF5-1 -TuF5-3
 87. Hansen P. B, Eskildsen L, Grubb S. G. Capacity upgrades of transmission system by Raman amplification. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(2): 262~264
 88. Yoshihiro EMORI, Shu NAMIKI, Reguar Members. Broadband Raman Amplifier for WDM. IEICE TRANS. ELECTRON., 2001, E84-C(5): 593~597
 89. Shu Namiki , Yoshihiro Emori. Ultrabroad-Band Raman Amplifiers Pumped and Gain-Equalized by Wavelength-Division-Multiplexed High-Power Laser Diodes. IEEE Journal on selected topics in Quantum Electronics, 2001, 7 (1): 3~16
 90. Vittorio Curri. System advantages of Raman amplifiers. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14 (7): 1005~1010
 91. Victor E. Perlin, Herbert G. Winful. On distributed Raman amplification for ultrabroad-band long-haul WDM system. Journal of Lightwave technology, 2002, 20 (3): 409~416
 92. Victor E. Perlin, Herbert G. Optimal Design of Flat-Gain Wide-band Fiber Raman Amplifiers. Journal of Lightwave technology, 2002, 20 (2): 250~254
 93. P. M. Krummrich, R. E. Neuhauser, C. Glingener. Bandwidth limitations of broadband distributed Raman amplifiers for WDM systems. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001, 2: TuF5-1 -TuF5-3
 94. Alan F. Evans, Jim Grochocinski, Ashiqur Rahman. Distributed Amplification: How Raman Gain Impacts Other Fiber Nonlinearities. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001, 2: TuF7-1 -TuF7-3
 95. Alan F. Evans. Raman amplification in broadband WDM systems. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001, 2: TuF4-1 -TuF4-3
 96. R. E. Neuhauser, P. M. Krummrich, H. Bock. Impact of nonlinear pump interactions on broadband distributed Raman amplification. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001, 1: MA4-1 -MA4-3
 97. Kyung Hee Seo, Jae Seung Lee. Signal transmission analysis of backward-pumped fiber Raman amplifiers. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14 (7): 932~934

98. Hiroji Masuda. Review of wideband hybrid amplifiers. Optical Fiber Communication Conference, 2000, 1: 2~4
99. Hiroji Masuda. Wide-band and low noise optical amplification using distributed Raman amplifiers and erbium-doped fiber amplifier. Electron. Lett., 1998, 34 (13): 250~256
100. S. Kawai, Hiroji Masuda, Ken-Ichi Suzuki. Wide-bandwidth and long-distance WDM transmission using highly gain-flattened hybrid amplifier. IEEE Photonics Technology Letter, 1999, 11: 886~888
101. Hiroji Masuda, Shingo Kawai. Wide-band and gain-flattened hybrid amplifier consisting of an EDFA and a multiwavelength pumped Raman amplifier. IEEE Photonics Technology Letter, 1999, 11(6): 647~649
102. A. Carena, V. Curri, P. Poggiolini. On the Optimization of Hybrid Raman/Erbium-doped Fiber Amplifiers. IEEE Photonics Technology Letter, 2001, 13(11): 1170~1172

致 谢

本文的选题和研究工作是在导师邱昆老师的悉心指导下完成的。因此我要特别感谢邱昆老师这两年多来在学业上、生活中给予我的无微不至的关心和帮助。在这两年半的时间里，邱昆老师严谨的治学态度，开阔的视野和广博的专业知识无时无刻不在熏陶着我，激励着我。

我也要感谢实验室邱琪老师、周东老师、孙维勇老师等给我的各方面的关心和照顾，让我的论文工作得以正常进行，顺利完成。

我还要感谢光纤通信重点实验室的所有同学，是你们在我遇到困难的时候给予我鼓励和帮助，同时让我的生活得以丰富多彩。

最后我要深深地感谢我的父母和我的女朋友陈玥在我硕士期间对我的无私奉献，你们一直以来的理解和支持让我度过了一个又一个难关，谢谢你们！

作者简历及攻读硕士学位期间学术活动情况

个人简历



薛飞，男，1979年3月13日生于四川成都。

1997年9月——2001年7月 电子科技大学应用物理
系获应用物理学学士学位

2001年9月——至今 电子科技大学通信与信息工程学
院攻读光学工程专业硕士学位

论文发表情况

1. 薛飞，邱昆，张宏斌。一种混合光纤放大器的设计，电子科技大学学报，Vol.31, No.1, Feb.2002
2. Fei Xue, Kun Qiu, Zhonggui Li. The Research of Raman Fiber Amplifier in 40Gb/s Optical Fiber Communication System. IEEE 2002 International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions. ChengDu, Vol.1, Jul.2002
3. 薛飞，邱昆。一种宽带光纤喇曼放大器的设计，光电子·激光，Vol.14, No.4, Apr.2003
4. 薛飞，邱昆。C波段集中式光纤喇曼放大器的研究，电子科技大学学报，Vol.31, No.5, Oct.2002
5. 薛飞，邱昆，李中桂。S波段宽带光纤喇曼放大器研究，光子学报，Vol.32, No.6, Jun.2003
6. 薛飞，邱昆，崔炳华。两类喇曼光纤放大器的研究，应用光学，Vol.24, No.4, Aug.2003
7. 薛飞，邱昆，李中桂。基于混合光纤放大器的波分复用光纤传输系统研究，光学技术，Vol.29, No.4, Aug.2003
8. Fei Xue, Kun Qiu, Yue Chen. Research on WDM optical fiber transmission system based on fiber Raman amplifier. Chinese Optics Letters. Vol.1, No.10, Oct.2003

9. 薛飞, 邱昆, 李中桂。 宽带混合光纤放大器的研究, 2003 年第 11 次全国光纤通信会议暨第 12 届集成光学学术会议论文集, 南京, Oct.2003
10. Xue Fei, Qiu Kun. Research on Raman Crosstalk in Broadband Wavelength Division Multiplexed Systems. Journal of Electronic Science and Technology of China. Vol.1, No.2, Mar.2004

学术交流

1. 2002 年 7 月在成都参加了 2002 International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions, 在分组讨论会上做了题为《The Research of Raman Fiber Amplifier in 40Gb/s Optical Fiber Communication System》的报告。
2. 2003 年 10 月在南京参加了 2003 第 11 次全国光纤通信会议暨第 12 届集成光学学术会议, 在会上做了题为《宽带混合光纤放大器的研究》的学术报告。