

# 卫星激光通信中光纤放大器的应用研究

雷建设 黄肇明

(上海大学通信与信息工程学院, 上海, 200072)

郭振华

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

**摘要:** 介绍了卫星激光通信的特点, 通过计算分析, 提出了用于卫星激光通信光发射系统的高功率光纤放大器、用于光接收系统的前置光纤放大器的性能参数。给出了高功率光纤放大器和低噪声前置光纤放大器的实验方案。

**关键词:** 卫星 激光通信 光纤放大器

## Application of optical fiber amplifier for satellite laser communication

*Lei Jianshe, Huang Zhaoming*

(School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai, 200072)

*Guo Zhenhua*

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** In the paper, the character of satellite communication is introduced. Based on calculation and analysis, the performance parameters of high power optical fiber amplifier for transmitter system and optical fiber preamplifier for receiver system of satellite laser communication have been put forward. The experimental layout of high power optical fiber amplifier and low noise figure optical fiber preamplifier is given.

**Key words:** satellite laser communication optical fiber amplifier

## 引 言

卫星间通信传统采用微波技术。微波通信设备重达几百公斤, 需要直径几米的天线, 中继卫星体积庞大、价格昂贵、通信容量小。卫星激光通信是利用激光进行星间通信, 它是一个具有极大潜力的研究领域, 对 21 世纪通信发展和空间活动是必不可少的。卫星间采用激光通信具有以下优点: (1) 通信设备体积小、重量轻; (2) 宽带宽、大容量; (3) 抗干扰性好; (4) 费用

- 2 苏家文, 刘 铁, 李玉霞. 皮肤病与性病, 1999; 21(2): 46
- 3 李红霞, 夏明玉, 朱文元. 中华皮肤科杂志, 1995; 28(1): 25~ 26
- 4 刘家玉, 赵志强. 皮肤病与性病, 1999; 21(3): 51~ 52
- 5 武秋林, 练永坚. 实用妇产科杂志, 1999; 15(2): 109
- 6 唐均英, 黄 萍, 梅跃宇 *et al.* 实用妇产科杂志, 2000; 16(1): 50
- 7 陈阿琼. 实用妇产科杂志, 2000; 16(1): 51

\* \* \*

作者简介: 许山川, 男, 1969 年 3 月出生。博士, 主治医师。主攻方向为增生性疾病的光动力疗法。

较低。星间激光通信技术是对传统星间微波通信技术的革命。早在 20 世纪 80 年代初郭振华就论及过外层空间卫星-卫星与深海潜艇-潜艇间的激光-微波-声波综合通信问题。使用目前的可行技术,光链路设计能获得超过 1.0Gbps 的码率,天线口径小于 25cm,整个装置重量低于 90kg 的激光通信设备。激光通信系统可以提供卫星间高速大容量通信,能够简化空间网络,利用小卫星之间激光通信将会最终实现全球范围内的个人移动通信和未来地-月间的长距离通信<sup>[1]</sup>。

对卫星激光通信技术的研究在美、日、欧等国已开展了近 20 年。1989 年,欧洲空间局开发出第 1 代激光通信系统,用于低轨道卫星与静止卫星间的通信,目前,正在第 1 代的基础上开发第 2 代激光通信设备。日本也已进行过多次卫星与地面的激光通信实验。美国已完成卫星激光通信设备的地面测试系统,并对其开发的激光通信设备进行过系统测试,还进行过地面与地面、飞机与地面的激光通信实验<sup>[2]</sup>。

现在掺铒光纤放大器(EDFA)在地面光纤通信系统中已得到广泛的商业应用,可以肯定,光纤放大器在卫星激光通信中也将具有重要的应用<sup>[3]</sup>。

卫星激光通信系统可由 3 个主要的子系统组成:(1)光发射子系统;(2)光接收子系统;(3)瞄准、捕获、跟踪子系统。

目前,比较好的光发射系统是中小功率半导体激光器(或固体激光器)加上高功率光纤放大器构成主振功放系统,接收系统则采用光纤放大器进行前置放大以便提高接收系统的灵敏度和提高整个系统的传输距离与码率。光纤放大器作为前置放大器时必须具有低的噪声系数。上述两种光纤放大器还应具有高可靠性和高能量转换效率。现在,国际上很多研究机构都在研究高功率光纤放大器以及低噪声系数光纤放大器,努力开发新一代卫星激光通信系统<sup>[4,5]</sup>。

## 1 星间激光通信系统的光链路计算

星间激光通信可以分为 3 种,一种是高轨道静止卫星与高轨道静止卫星(GEO-GEO),另一种是高轨道静止卫星与低轨道卫星(GEO-LEO),还有一种是低轨道卫星与低轨道卫星(LEO-LEO)。GEO 之间相距甚远,大约是  $8.4 \times 10^4$  km,而 GEO-LEO 的距离则为  $4 \times 10^4$  km 左右。下面计算 GEO-GEO 与 GEO-LEO 的光学链路。

$$\text{裕量 } M \text{ 可表示为: } M = 10 \lg(P) + L_t + G_t + L_p + L_n + L + G_R + L_R - 10 \lg(S_{\text{req}}) \quad (1)$$

式中,  $P$  为激光器峰值功率(W),  $L_t$  为发射机光路损耗(dB),  $G_t$  为发射天线增益(dB),  $L_p$  为发射机指向损耗(dB),  $L_n$  为发射天线波前效率(dB),  $L$  为自由空间传播损耗(dB),  $G_R$  为接收天线增益(dB),  $L_R$  为接收机光路损耗(dB),  $S_{\text{req}}$  为接收机灵敏度(W)。

对应于 GEO-GEO<sup>[6]</sup>, 距离  $Z = 8.4 \times 10^7$  m。当激光器发射波长为 1550nm 时,自由空间传播损耗  $L = 10 \lg(M 4\pi Z)^2 = -300$  dB,接收天线增益  $G_R = 10 \lg(2\pi a / \lambda) = 115$  dB(接收天线半径  $a = 10$  cm),  $L_t = -3.0$  dB,  $G_t = 112.3$  dB,  $L_p = -4.4$  dB,  $L_n = -1.0$  dB,  $L_R = -3.0$  dB。

若误码率  $\text{BER} < 10^{-9}$ , 则每比特数据信号的最小光子数  $N_p > 20$ , 即每个光脉冲至少应该包含 20 个光子,才能达到误码率的要求,这也就是光探测的量子极限。那么,当码率为  $B$  时,接收机灵敏度:  $P_m = N_p h \nu B / 2$  (2)

计算举例:对应于波长 1550nm,单光子能量  $h\nu = 0.8$  eV。

(1) 在 GEO-GEO 系统中,码率  $B = 1$  Gbps,若取  $N_p = 100$ ,那么在满足误码率  $\text{BER} < 10^{-9}$  的

情况下,由(2)可得:  $P_m = 6.510^{-9}W$ ,  $P_m$  也就是  $S_{req}$  的极限值,把它以及前面计算的  $L, G_R$  等增益与损耗值代入(1)式,可得  $10 \lg(P) = 15.2 + M(\text{dB})$ ,当取  $M = 3\text{dB}$  时,则最后得到激光器峰值功率  $P = 3.3W$ 。

(2)在LEO-GEO系统中,LEO-GEO的距离  $Z = 4 \times 10^7\text{m}$ ,那么空间损耗  $L = 10 \lg(N4\pi Z)^2 = -290\text{dB}$ ,若其它条件与GEO-GEO相同,只有自由空间损耗相差10dB,类似地可求得激光器峰值功率  $P = 0.33W$ 。

由上面的计算可知,如果光接收系统具有纳瓦级高灵敏度,那么高码率(1.0Gbps)的卫星激光通信系统只需要光发射系统提供瓦级功率。提高发射功率和提高接收机灵敏度则可以提高最大通信距离。目前,国际上的光通信实验系统广泛采用半导体激光器,其发射功率只有几百毫瓦,限制了通信距离和信息传递速率(码率)。若采用半导体激光器加上光纤放大器的发射系统则可以达到瓦级。另一方面,用光纤放大器对探测器接收到的信号进行前置放大,可以大大提高接收机的灵敏度。

## 2 光发射系统的结构与高功率光纤放大器的实验研究方案

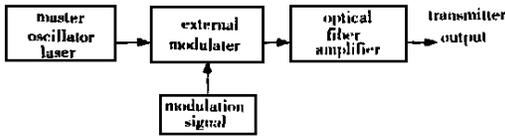


Fig. 1 A master-oscillator power-amplifier (MOPA) transmitter

激光器是半导体加尾纤型激光器,线宽为1~2MHz,采用马赫-泽德尔强度调制器作为相位调制器,以实现全π调制深度。

高功率光纤放大器的实验采用Er/Yb共掺杂双包层光纤,由一个宽条半导体激光器泵浦包层。采用共掺光纤和进行包层泵浦都使信号增益大大提高。Yb能吸收泵浦能量并有效转换给Er粒子,在1550nm附近实现功率放大。不是在光纤的两端,而是在光纤的包层开一V型槽,利用一微会聚透镜进行包层泵浦(见图2)。Er/Yb共掺杂双包层光纤(朗讯光纤)芯径6.6μm;近六边形石英内包层直径130μm,数值孔径0.45;外包层为聚合物;泵浦激光器为长1mm宽100μm板条型半导体激光器(SDL Inc. 6360),波长975nm。泵浦功率为4.5W时,放大器输出功率为1.58W;小信号增益57dB,饱和输出功率0.63W。

光发射系统通常采用主振功放(MOPA)结构。其原理性方框图示于图1。这种方案的好处是:光束质量好;可以获得瓦级功率;光发射系统可靠性可达 $10^5\text{h}$ 。在目前激光器技术条件下,它是满足卫星激光通信要求的光发射系统最有竞争力的方案之一。主激

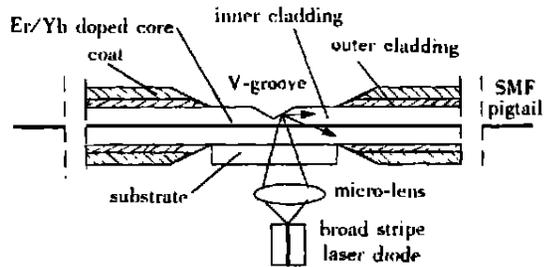


Fig. 2 V-groove side-pumping arrangement for the Er/Yb double cladding fiber

## 3 掺铒光纤放大器(EDFA)用作光接收机的前置放大器的实验方案

根据光学通信链路分析计算,求出在一定发射功率、一定码率时可接收到的光功率,由此导出接收机前置放大器的性能参数如增益(G)、噪声系数(NF)、信噪比(S/N)等。

EDFA作为前置放大器应具有低的噪声系数。在理论上EDFA噪声系数的量子极限为3dB。EDFA作预放时系统的噪声包括放大的信号白噪声、放大的自发辐射白噪声、信号光与

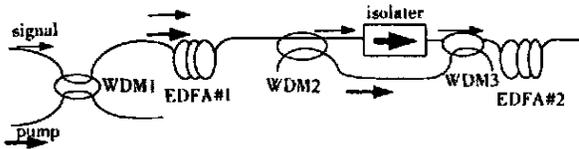


Fig. 3 Schematic of the composite erbium-doped fiber amplifier (EDFA) configuration

自发辐射光的拍频噪声、自发辐射光分量之间的拍频噪声,以及接收机的常规噪声。

实验采取以下措施降低噪声系数:采用 980nm 半导体激光器泵浦;在两级 EDFA 中间加入光学隔离器,隔

离器可以抑制反向传输的 ASE,减小噪声系数。采用图 3 复合结构的 EDFA,在泵浦功率为 45mW 时获得 54dB 的增益和 3.5dB 的噪声系数。

在图 3 中,隔离器把整个掺铒光纤放大器分为前后两部分 EDFA# 1 和 EDFA# 2,将实际光放大器视为两个放大器的级联。放大器的特性可以用两式来简单描述。 $G = G_1 + G_2$ ;  $NF = NF_1 + NF_2 / G_1$ 。当  $G_1$  较大时,  $NF = NF_1$ 。因此,优化纤段 1 以改善噪声指数,优化纤段 2 以提高增益。优化步骤为:(1)根据对噪声指数的总要求,优化纤段 1 的长度以及所需泵浦功率;(2)根据对增益的总要求,优化纤段 2 的长度以及所需泵浦功率;(3)根据两纤段所需的泵浦功率,决定耦合器的分光比。

放大器的光纤参数:锗硅芯,数值孔径 0.24,截止波长 920nm,EDFA# 1 的长度是 25m,EDFA# 2 的长度是 60m,耦合器 WDM2 插入损耗(0.11/0.31)dB (pump/signal),耦合器 WDM3 插入损耗(0.16/0.31)dB (pump/signal);隔离器插入损耗 1dB。

#### 4 结束语

为了开发新一代卫星激光通信系统,光发射系统采用高功率光纤放大器作为功放,光接收系统采用低噪声系数光纤放大器作为前放,就能达到传输距离远、码率高、可靠性高的要求,适应现代信息社会对卫星通信的依赖。不断提高高功率光纤放大器的输出功率、降低前置光纤放大器的噪声系数以及提高它们的可靠性则是国际上目前的研究重点。

#### 参 考 文 献

- 1 谭立英,马 晶. 电信科学, 1999; 1: 34~ 36
- 2 Lesh J R. Space Communication, 1998; 15: 65~ 70
- 3 Boroson D M. SPIE Proc, 1992; 1866: 30~ 35
- 4 Araki T. SPIE Proc, 1996; 2699: 266~ 277
- 5 Araki T, Yamakawa S, Funuya M *et al.* SPIE, 1998; 3266: 42~ 48
- 6 Katzman M. Laser Satellite Communication. Englewood Cliffs, N J: Prentice-hall, 1987: 55

\* \* \*

作者简介:雷建设,男,1970年10月出生。讲师,博士研究生。主要从事光纤通信与卫星激光通信方面的研究工作。

收稿日期:2000-06-26 收到修改稿日期:2001-01-15