

•光电器件与材料•

远程遥泵放大器研究

王 侠, 欧阳竑, 刘兴江, 尚 军, 陈 凯, 岳耀笠

(中国电子科技集团公司第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

摘 要: 远程遥泵放大器是超长跨距无中继光纤通信系统中的关键器件, 介绍了远程遥泵放大器(ROPA)的基本原理, 提出了一种适合超长跨距无中继全光通信系统实用的远程遥泵掺铒光纤放大器设计方案, 并结合实际测试结论和软件仿真结果, 对影响远泵放大器增益的若干问题进行了分析论证。得出的结论可作为超长距离遥泵放大系统设计的重要参考。

关键词: 无中继光纤通信系统; 超长距传输; 远程遥泵掺铒光纤放大器; 非线性效应; 拉曼频移; 阈值

中图分类号: TN913.7

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-06-0020-06

Research on Remote Pumped Amplifier

WANG Xia, OUYANG Hong, LIU Xing-jiang, SHANG Jun, CHEN Kai, YUE Yao-li

(The 34th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Guilin 541004, China)

Abstract: The remote pumped amplifier is the key component of ultra-long span unrepeated all-optical communication system. The basic principle of the remote pumped amplifier (ROPA) is introduced. A practical remote pumped Erbium doped fiber amplifier design scheme suitable to the ultra-long span unrepeated all-optical communication system is proposed. And with practical test conclusion and software simulation result, the problems influencing remote pumped amplifier gain are analyzed and discussed. The conclusion can be used as an important reference for the ultra-long span remote pumped amplified system design.

Key words: unrepeated all-optical communication system; ultra-long span transmission; remote pumped Erbium doped fiber amplifier; nonlinearity effect; Raman frequency shift; threshold

光纤通信由于频谱宽、容量大、损耗低、抗干扰、保密性好、体积小、质量轻等突出优点, 在现代信息社会里发挥着越来越重要的作用。但正如所有的通信系统一样, 光纤通信也存在衰减。正常情况下, 每隔 80~100 km 就需要设置有电能供给的中继设备(中继器或光纤放大器), 对信号光进行补偿和修复。在一些地理条件和环境状况复杂、特殊, 电能供给不便而通信距离又比较长的信息传输场合, 如连绵的高山, 广袤的海底, 了无人烟的荒原沙漠, 动荡不安的战乱区等地理条件和环境状况复杂, 人员、设备安全难以保证的特殊区域, 由于光纤放大器设置和维护工作不便, 就需要使用在传输线路中没有任何电的能量供给的超长跨距无中继光纤通信系统。该系统采用端到端直达通路, 不需要

中继供电就可以使整个传输系统的站间距离达到数百千米, 具有可靠性高、建设成本低、开通迅速、维护方便等突出特点。在国外已有许多实际应用^[1], 近些年来也已在我国长距离电力通信专用网络中取得逐步应用^[2]。

要实现超长跨距无中继光纤传输就必须克服传输损耗、色散的影响, 保证能在接收端获得足够的光信噪比。为了使信号光在光纤中传输时能量更集中、传得更远, 通常需要有较窄的信号谱宽和更高的出射功率, 但若一味增加信号功率又容易引起光纤的非线性效应, 主要有包括受激布里渊散射 SBS 和受激喇曼散射 SRS 等在内的受激散射效应和包括自相位调制 SPM、交叉相位调制 XPM 以及四波混频 FWM 等在内的折射率调制效应等。这些非线性

性效应会增加系统噪声,影响系统性能。故不能只是一味增加发射端信号光源功率或功率放大器增益。但如果任由信号光功率减弱,到一定程度时,由于信号光已淹没在噪声中,即使在接收端加入了光前置放大器,在接收端也将难以从噪声中检测出信号,会使光通信系统无法正常运行。因此只能在传输线路中的合适位置对信号光进行补充,常用的方式有分布式喇曼放大或远程遥泵EDFA放大。

实际测试发现,传输距离在280 km以内的光纤通信系统,只需在发射端加入EDFA光功率放大器、接收端加入EDFA光前置放大器进行信号功率的补偿,即可弥补光纤传输衰减带来的损耗。而对于传输距离在350 km以上的超长跨距无中继光纤通信系统,就需要采用远程遥泵光放大技术,文中将重点讨论远程遥泵EDFA放大,其基本工作原理与普通EDFA放大器相仿,只是泵浦光源组件放置在信号光的发送端或接收端,其作用是在传输链路中,在EDFA光放大的基础上进一步增加系统的可用光功率,达到延伸系统无中继传输距离的目的^[2]。

1 远程遥泵掺铒光纤放大器设计

远程遥泵放大器主要由泵浦组件和增益模块组成,如图1所示。

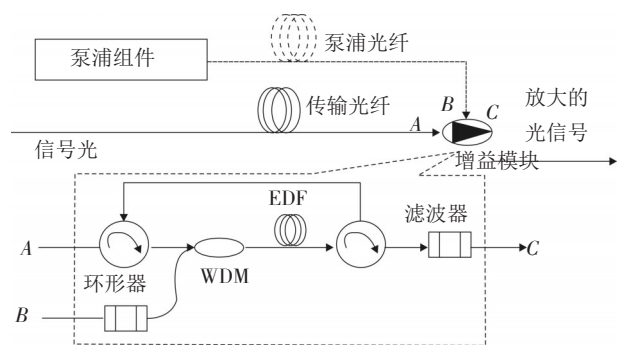


图1 远程遥泵光放大技术原理

泵浦组件放置在信号光的发送端或接收端,通常采用瓦级光纤激光器构成,根据需要可以用多个不同输出波长的激光器层叠泵浦。泵浦组件主要为增益模块提供泵浦能量。增益模块的核心是一段合适长度的EDF(掺铒光纤),利用光纤中铒离子能级的跃迁,为输入信号光提供低噪声增益。模块中的光环行器用来阻隔放大噪声向下游光纤传输链路的泄漏,光滤波器用来消除反射信号对泵浦光

源的影响并滤除信号光周边的噪声,可通过选择高效率低噪声掺铒光纤及优化掺铒光纤长度来改善放大性能及噪声系数^[2]。

根据泵浦光和信号光是否同在一根光纤中传输,远程遥泵技术可分为随路和旁路两种方式。采用旁路遥泵方式,泵浦与信号之间不存在交互影响,有利于提高大功率泵浦光的有效传输距离。而泵浦作用距离也是远程遥泵光放大技术中的核心问题,它很大程度上决定着无中继系统实际传输跨距^[2]。

根据前文内容,结合实际系统需要,对远程遥泵掺铒光纤放大器进行了设计。

首先是泵浦光源的选择,前文已述,增益模块是利用光纤中铒离子能级的跃迁来实现对信号光的放大,所以泵浦组件的波长选择要根据铒离子的吸收谱来决定,图2和图3分别给出了铒纤的吸收谱和铒离子的能级示意图。

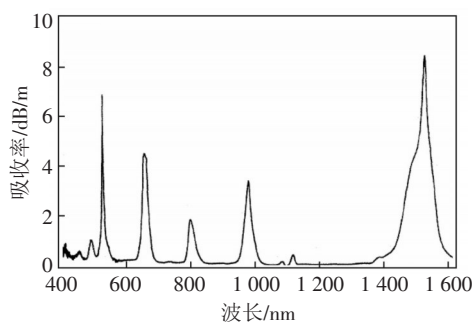


图2 铒纤吸收谱

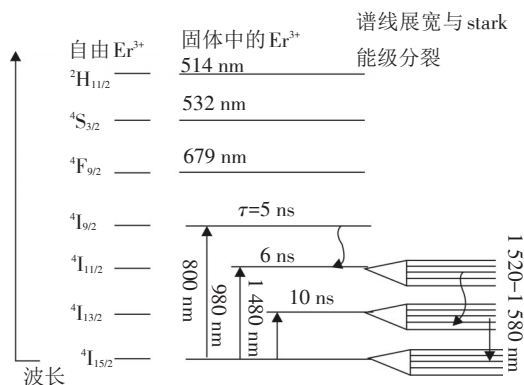


图3 铒离子能级示意图

由图2可见,泵浦波长可以是514 nm、679 nm、800 nm、980 nm和1480 nm,但实际应用中发现,波长短于980 nm的泵浦效率低,因而只能采用980 nm和1480 nm作为掺铒光纤放大器的泵浦波长。

对远程遥泵掺铒光纤放大器而言,还必须考虑泵浦光需要先在光纤中传递几十公里才能到达掺铒光纤这个问题,因此需要查看光纤对不同波长激光的损耗。图4为光纤通信窗口。

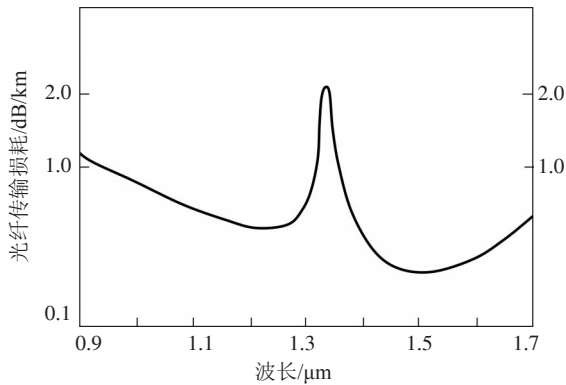


图4 光纤通信窗口

由图4可知,光纤对1480 nm波长光的损耗远小于980 nm,实际上980 nm的光在普通单模光纤中的衰减达到1.15 dB/km。而1480 nm的光损耗仅为

0.24 dB/km^[4]。故一般选用1480 nm波长的激光器作为远程遥泵掺铒光纤放大器的泵浦源。

考虑到通信用光纤多为锗硅光纤,而锗硅光纤的喇曼频移量为440 cm⁻¹,根据喇曼光纤激光器第*i*阶输出波长的计算公式(公式1),计算得知

$$\frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_{i+1}} = \Delta S \left(\frac{1}{\text{nm}} = \frac{1}{\text{cm}} \times 10^7 \right) \quad (1)$$

1389.5 nm的光发生喇曼频移后会变成1480 nm波长的光,1480 nm的光再次发生喇曼频移后会变成1550 nm波段的光,固有文献提出“可采用1390 nm+1480 nm层叠泵浦传输和光纤喇曼频移技术,提高泵浦注入功率,延长遥泵作用距离^[2]”。即用1390 nm波长第一次喇曼频移产生的1480 nm的光泵浦掺铒光纤得到1550 nm的增益光,同时再用1390 nm波长两次喇曼频移产生的1550 nm的光再次放大信号光。另有文献指出“后向遥泵比前向遥泵可以提供更多增益,因此优先考虑采用后向遥泵^[4]”。

据此,实际搭建了如图5所示试验系统。

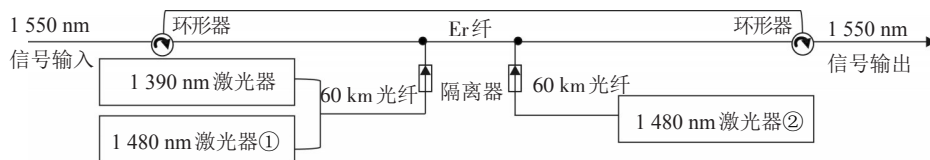


图5 远程遥泵放大器测试系统

对上述结论通过试验实测结果进行分析,并通过GainMaster仿真软件进行辅助分析。系统中泵浦作用距离和铒纤长度是根据实际工程系统需求和前期工程试验经验以及仿真计算结果得出,文中不再展开描述。

2 远程遥泵掺铒光纤放大器测试与仿真

为验证远程遥泵掺铒光纤放大器是使用1390 nm波长泵浦增益更高还是1480 nm泵浦增益更高及前向泵浦增益更高还是后向泵浦增益更高这两个问题,实际搭建了如图5所示试验系统。实际测试了不同泵浦条件下的输出信号功率,并用GainMaster软件对系统输出信号功率进行了仿真,测试和仿真结果记录在表1中。表中有个别数字因为测试时仪表读数跳动过大,无法准确读出,就以XX表示。试验进行到一半时更换了1390 nm+1480 nm①激

光器组和1480 nm②激光器的位置,即表中的“换光路”。因GainMaster仿真软件无法仿真1390 nm激光器,故分析结论应以实测数据为准

3 远程遥泵掺铒光纤放大器测试与仿真结果分析

3.1 固定长度的铒纤有饱和功率,一味增加泵浦功率并不能获得更高增益

用EXCEL根据表1数据绘制了远程遥泵掺铒光纤放大器泵浦总功率与输出功率对照图(如图6)。从图6中不难看出,对于试验系统选择的4.1 m掺铒光纤来说,泵浦总功率达到2900 mW以后,系统输出功率就慢慢开始变成一条平直线了,说明此时铒纤已经饱和,即使泵浦功率继续增加,系统增益也不能再增加多少了,这是符合光纤放大器一贯

规律的。在后面的分析中,为保证结果的准确性, 进行对比。
应尽量选择泵浦总功率小于3 000 mW的测试数据

表1 远程遥泵放大器测试及仿真结果

编号	1 550 nm 信号功率 /dBm	前泵1 390功率 /mW	前泵1 480①功率 /mW	后泵1 480②功率 /mW	输出信号功率 实测值/dBm	输出信号功率仿真结 果/dBm
01	5.05	×	1 800	×	14.38	16.744
02	5.05	×	×	300	7.49	9.783 3
03	5.05	×	×	1 260	13.83	15.341
04	4.95	×	1 600	×	14.45	16.265
05	4.95	×	1 700	×	14.58	16.505
06	4.95	×	1 700	500	15.74	17.528
07	4.95	×	1 700	900	16.48	18.186
08	5	×	1 700	1 200	16.98	18.62
09	5	×	1 700	1 250	17.03	18.687
10	5	2 000	700	×	14.91	
11	5	2 400	600	×	15.xx	
12	5	2 000	700	×	14.93	
13	5	2 000	700	1 200	17.13	
14	5	2 000	700	1 250	17.2	
15	5	2 000	×	1 250	15.74	
16	5	2 800	×	1 250	16.81	
17	5	2 800	300	1 250	17.34	
18	5	2 800	200	1 250	17.25	
19	5	2 800	400	1 250	17.29	
20	5	2 600	400	1 250	17.29	
21	5	2 700	400	1 250	17.xx	
编号	1 550 nm 信号功率 /dBm	后泵1 390功率 /mW	后泵1 480①功率 /mW	前泵1 480②功率 /mW	输出 /dBm	换光路
22	5		1 200		12.98	15.14
23	5		1 700		13.xx	16.518
24	5		1 650		14.3	16.4
25	5		1 600		14.25	16.279
26	5		1 600	500	15.43	17.357
27	5		1 600	1 000	16.39	18.196
28	5		1 600	1 300	16.89	18.622
29	5		1 600	1 350	16.94	18.689
30	5		×	1 350	13.56	15.602
31	5		×	1 300	13.85	15.453
32	5		×	1 250	13.65	15.298
33	5		1 600	1 250	16.81	18.555
34	5	2 500	400	1 250	17.15	
35	5	2 800	300	1 250	17.19	
36	5	2 600	300	1 250	17.15	

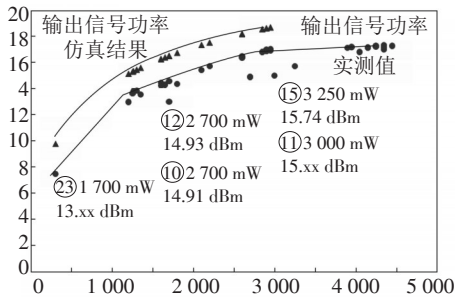


图6 远程遥泵放大器测试系统泵浦总功率与输出功率对照图

3.2 1 390 nm和1 480 nm光之间可能会发生模式竞争

实测结果发现有5条数据明显不正常,查找后发现分别对应的表1中第10、11、12、15和23条数据,这5条数据均未在进行上述分析时作为结论性数据使用。同时观察到除第23组数据本身跳动很大,读不出准确数字外,其余几条全部都是1 390 nm泵源作为前泵时功率在2 000 mW左右,而1 480 nm泵

浦总功率又比较小时出现的,特别是第10、11、12条数据,都是1 390 nm前泵功率2 000 mW左右,1 480 nm前泵功率700 mW左右,后泵功率为零。分析怀疑1 390 nm、2 000 W正是本系统1 390 nm向1 480 nm发生喇曼频移的阈值,若此时1 480 nm泵浦总功率较小,则会使激发作用变弱,出现1 390 nm和1 480 nm之间的模式竞争,并最终导致系统总增益下滑,该现象在其他试验中也曾观测到^[9]。但具体原因还有待进一步的试验论证。

3.3 同等泵浦总功率下,1 390 nm+1 480 nm层叠泵浦方案并不都能获得更高增益

对比第9、15、16条数据发现,当后泵所用激光器、后泵输出功率、信号输入功率均保持不变的前提下,泵浦功率不超过3 W时,用1 390 nm的激光器作为前向泵浦泵源,输出信号功率比用1 480 nm的激光器作为前向泵浦泵源时小,哪怕1 390 nm的泵源输出功率更高,系统增益仍不如用1 480 nm激光器作为前向泵浦泵源时高。结果如表2所示。

表2 第9、15、16条数据对比结果

编号	前泵		后泵		增益		
	泵源	泵浦功率 /mW	泵源	泵浦功率 /mW	输出信号功率 /dBm	输入信号功率 /dBm	增益 /dB
09	1 480 nm①	1 700	1 480 nm②	1 250	17.03	5	12.03
15	1 390 nm	2 000	1 480 nm②	1 250	15.74	5	10.74
16	1 390 nm	2 800	1 480 nm②	1 250	16.81	5	11.81

分析认为造成该现象的主要原因有:

(1)从图2 铟纤吸收谱可以看出,Er在1 480 nm附近有一个吸收峰,而在1 390 nm附近没有,故铟纤对1 480 nm的泵浦光吸收效率更高,转换效率也更高;

(2)从图4 光纤通信窗口可以看出,1 480 nm在光纤中的传输损耗比1 390 nm的更低,1 390 nm泵浦光经过远程传输后损耗较大,即使全部通过喇曼频移转换成1 480 nm的光,也不一定比直接使用1 480 nm光远程传输后剩余的多;

(3)根据参考文献[6]和参考文献[7],得到系统发生受激布里渊散射^[6]和受激喇曼散射^[7]的阈值功率计算公式为

$$P_{th} = \frac{GA_{eff}}{g_0 L_{eff}} = \frac{GA_{eff} \alpha_0}{g_0 [1 - \exp(-\alpha_0 L)]} \quad (2)$$

其中,G表示阈值增益系数; A_{eff} 表示光纤有效截面积; g_0 表示布里渊(或喇曼增益峰值); L_{eff} 表示光纤有效长度; α_0 表示光纤损耗系数^[6-7]。

虽然经计算,3 W的1 390 nm的泵浦光已经超过引发非线性效应的阈值了,理论上可以通过喇曼效应转变成1 480 nm的泵浦光再对铟纤进行有效泵浦,但因为1 390 ~1 480 nm还有一个光光转换效率,算上这个转换损耗,实际上用同等功率的1 390 nm的光泵浦铟纤比直接用1 480 nm的光泵浦效率低。

因此文献[2]结论“可采用1 390 nm+1 480 nm层叠泵浦传输和光纤喇曼频移技术,提高泵浦注入功率,延长遥泵作用距离”还需分情况来看,如果系统需要的增益很高,仅用1 480 nm的泵浦光已无法满足系统对泵源功率的需求,而一再提高1 480 nm泵源的功率又可能引发强烈的喇曼效应,直接将

1 480 nm 的光全部转移到 1 550 nm 波段,无法对铒纤进行有效泵浦时,或许可以考虑 1 390 nm+1 480 nm 层叠泵浦方案,当然此时也已可以考虑使用喇曼放大器来代替远程遥泵掺铒光纤放大器了。所以 1 390 nm+1 480 nm 层叠泵浦方案的实用性有待商榷。

3.4 后向遥泵并不能比前向遥泵提供更多增益

分别对比第 3 和 32,以及 4 和 25 两组数据,可见单端泵浦时,同一个 1 480 nm 泵浦激光器不论采用前向泵浦方式还是后向泵浦方式,系统增益变化不大,总体来看,作为前向泵浦时增益还会稍高一点。对比结果如表 3。

表 3 第 3 和 32、第 4 和 25 两组数据对比结果

编号	泵源方式	输入信号功率/dBm	输出信号功率/dBm		增益/dB	
			实测值	仿真结果	实测值	仿真结果
32	1 480 nm②激光器前向泵浦 1 250 mW	5	13.65	15.298	8.65	10.298
03	1 480 nm激光器后向泵浦②1 260 mW	5.05	13.83	15.341	8.78	10.291
04	1 480 nm①激光器前向泵浦 1 600 mW	4.95	14.45	16.265	9.5	11.315
25	1 480 nm①激光器后向泵浦 1 600 mW	5	14.25	16.279	9.25	11.279

分别对比第 17 和 35、第 7 和 27、第 8 和 28 以及第 9 和 29 四组数据发现,双泵且总泵浦功率相同时,无论采用前向泵浦方式还是后向泵浦方式,系

统增益变化也不大,总体来看,前向泵浦功率更高时系统增益稍大些。对比结果如表 4。

表 4 第 17 和 35、第 7 和 27、第 8 和 28 以及第 9 和 29 四组数据对比结果

编号	前泵		后泵		输入信号功率/dBm	输出信号功率/dBm		增益/dB	
	泵源	功率/mW	泵源	功率/mW		实测值	仿真结果	实测值	仿真结果
17	1 390 nm+ 1 480 nm①	2 800+ 300	1 480 nm②	1 250	5	17.34	无	12.34	无
35	1 480 nm②	1250	1 390 nm+ 1 480 nm①	2 800+ 300	5	17.19	无	12.19	无
07	1 480 nm①	1 700	1 480 nm②	900	4.95	16.48	18.186	11.53	13.24
27	1 480 nm②	1 000	1 480 nm①	1 600	5	16.39	18.196	11.39	13.20
08	1 480 nm①	1 700	1 480 nm②	1 200	5	16.98	18.62	11.98	13.62
28	1 480 nm②	1 300	1 480 nm①	1 600	5	16.89	18.622	11.89	13.62
9	1 480 nm①	1 700	1 480 nm②	1 250	5	17.03	18.687	12.03	13.69
29	1 480 nm②	1 350	1 480 nm①	1 600	5	16.94	18.689	11.94	13.69

因此文献[4]指出的“后向遥泵比前向遥泵可以提供更多增益,因此优先考虑采用后向遥泵”,仍有待商榷。

4 结 论

远程遥泵掺铒光纤放大器是超长跨距无中继

光纤通信系统中的关键器件,引起了国内外专家、学者和工程技术人员的广泛兴趣,文章实际搭建了远程遥泵掺铒光纤放大器测试系统,通过实测结果结合软件仿真,对影响远泵放大器增益的若干问题进行了分析论证。并验证了在业界的几点设计建

(下转第 38 页)

参考文献

- [1] 高林柱. 光时域微分器研究进展[J]. 光通信技术, 2013, 37(011):45-47.
- [2] Madsen C K, Dragoman D, Azaña J, et al. Signal analysis tools for optical signal processing[J]. Eurasp J Appl Signal Proc, 2005, 10: 449-1623.
- [3] Liu Q, Ye Q, Pan Z. Design of all-optical temporal differentiator using a Moir ber grating[J]. Chinese Opt Lett, 2012, 10(9):092301.
- [4] Kulishov M, Azana J. Long-period fiber gratings as ultrafast optical differentiators[J]. OPTics Letters, 2005, 30:20.
- [5] Ngo N Q, YU S F, Tjin S C, et al. A new theoretical basis of higher- derivative optical differentiators[J]. Opt Commun, 2004, 230(1-3): 115-129.
- [6] Slavík R, Park Y, Kulishov M, et al. Ultrafast all-optical differentiators [J]. Opt Express, 2006, 14: 10699.
- [7] Li M, Janner D, Yao J P, et al. Arbitrary-order all-fiber temporal differentiator based on a fiber Bragg grating: design and experimental demonstration[J]. Optical Express, 2009, 17: 22.
- [8] Kulishov M, Krcmarik D, Slavik R. Design of terahertz-bandwidth arbitrary-order temporal differentiators based on long-period fiber gratings[J]. Optics Letters, 2007, 32: 20.
- [9] Slavik R, Park Y, Krcmarik D, et al. Stable all-fiber photonic temporal differentiator using a long-period fibergrating interferometer[J]. Optics Communications, 2009, 282: 2339-2342.
- [10] You H D, Ning T G, Jian W, et al. Optical temporal differentiator using a twin-core fiber[J]. Optical Engineering, 2013, 52(1): 015005.
- [11] Allan W S. Coupled-mode theory for optical fibers[J]. J Opt Soc Am, 1972, 62(11): 1267-1277.
- [12] Hardy A, Streifer W. Coupled mode theory of parallel waveguides[J]. J Lightwave Technol, 1985, 3(5).
- [13] Shi Y. Fabrication and characterization of high-speed polyurethane-disperse red 19 integrated electrooptic modulators for analog system applications[J]. IEEE J. of Sel. Topics Quantum Electron, 1996, 2(2):289.
- [14] You H D, Ning T G, Pei L, et al. An all-fiber optical temporal differentiator for wavelength- division- multiplexed system based on twin-core fiber[J]. Opt Quant Electron, 2014, 46(11):1481.
- [15] Cuadrado-Laborde C. All-optical ultrafast fractional differentiator[J]. Optical and Quantum Electronics, 2008, 40(13): 983-990.

(上接第25页)

议,得出以下结论:(1)超长跨距无中继光纤通信系统有着广泛的应用;(2)远程遥泵放大是超长跨距无中继通信系统中的关键技术;(3)实际工程中可采用旁路遥泵方式设计远程遥泵放大器;(4)泵浦光源宜采用 1 480 nm 波段光纤激光器组件构成,实际工程中多采用 1 480 nm 或 1 455 nm 光纤激光器构成;(5)不能仅依靠增加泵浦功率来获取较大增益,还需配套调整铒纤长度;(6)铒纤长度需根据系统所需增益、铒离子浓度、铒纤转换效率等多种因素综合设计;(7)1 390 nm+1 480 nm 层叠泵浦方案在实际工程应用中并不具备明显优势;(8)采用前向遥泵方式还是后向遥泵方式对系统增益的影响并不明显,具体采用哪种方式可根据系统实际应用环境确定。

参考文献

- [1] 夏江珍,谢同林,贾小铁,等. 507 km 超长站距无中继光传输系统[J]. 电力系统通信, 2009, 30(197): 10-12, 19.
- [2] 江尚军,黄誉,李亮. 超长跨距无中继全光传输系统关键技术研究[J]. 广东通信技术, 2012, 8: 42-46.
- [3] 江尚军,吴锦虹,罗青松. 基于 G. 652 光纤的超长跨距无中继全光通信系统设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(4): 406-410.
- [4] 程细海,徐健,殷天峰,等. 基于遥泵技术的超长距系统研究与应用[J]. 光通信技术, 2015, 6: 23-26.
- [5] 王侠,欧阳竑,刘霄海,等. 各种常见光纤喇曼增益谱分析[J]. 光通信技术, 2010, 32(7): 35-37.
- [6] 沈一春,宋牟平,章献民,等. 单模光纤中受激布里渊散射阈值研究[J]. 中国激光, 2015, 32(4): 497-500.
- [7] 秦祖军. 全光纤结构喇曼光纤激光器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.