

文章编号:1001-5078(2007)03-0208-03

机载软杀伤光源光纤激光组束方法的选择

胥 杰,赵尚弘,张 磊,方绍强
(空军工程大学电讯工程学院,陕西 西安 710077)

摘 要:简单介绍了光纤激光相干和非相干组束方法,理论上分析了非相干和相干组束的光纤个数。结果表明,非相干组束方法可以实现几百根光纤激光的合成,组束功率可以达到 10kW 量级,而相干组束方法只能实现大约 10 根光纤激光的合成。显然,非相干组束方法是实现机载软杀伤激光光源的理想选择。

关键词:机载激光光源;激光组束;非相干组束;相干组束

中图分类号:E928.9 **文献标识码:**A

Selection of Fiber Laser Beam Combination Methods for Airborne Soft-killing Laser Source

XU Jie, ZHAO Shang-hong, ZHANG Lei, FANG Shao-qiang
(The Telecommunication Engineering Institute, AFEU, Xi'an 710077, China)

Abstract: The methods of coherent and incoherent fiber laser beam combination are briefly introduced. The fiber numbers of both methods are theoretically analyzed. The results prove that several hundred fiber laser beams combination could be realized through incoherent beam combination methods, and the output power would reach the level of 10 kilowatt in contrast to 10 fiber laser through coherent combination method. Obviously, the incoherent fiber laser beam combination method is the ideal choice to realize airborne soft-killing laser source.

Key words: airborne laser source; laser beam combination; incoherent combination; coherent combination

1 引 言

随着激光技术的飞速发展,激光武器也在军事领域得到了广泛的应用。传统的大功率激光武器光源主要是化学激光器和准分子激光器,但受到其体积和质量的限制,一般只能用于陆基和车载移动平台,激光武器的灵活性受到了极大的抑制^[1]。以美国为代表的西方国家正在致力于机载激光武器系统的研究,并已有了初步的实验论证,所采用的高功率激光光源仍然是化学激光器。考虑到光纤激光器输出功率的不断提高,结合光纤激光光源质量小、体积小的优势,利用光纤激光组束技术可以得到满足软杀伤需求的低能激光武器光源,将其用于机载可大大提高激光武器的灵活性,具有很大的发展潜力。然而,利用何种方法实现机载软杀伤激光光源却是一个问题,这里我们对组束方法的

选择进行简单的分析。

2 组束方法

激光组束技术简单地说就是将多路激光束组合到一起,使之成为一束激光,由于能量守恒,该束激光的功率可得到相当程度地提高。激光组束的方法多种多样,一般分类为相干组束方法和非相干组束方法。

非相干组束方法如图 1 所示,一般是利用衍射光栅的耦合效应,将各阵列光纤激光在空间重叠,其原理类似波分复用。理想情况下组束输出功率应为单根光束的 N 倍。

相干组束需要精确控制每个阵元输出激光的位

作者简介:胥 杰(1980 -),男,博士研究生,研究方向为光电对抗。E-mail: xujie1225@163.com
收稿日期:2006-07-18

相,使其具有严格稳定的相差,多路激光束相干得到功率放大。相干组束的方法多种多样,主要有受激布里渊散射光纤组束、衍射光学元件光纤组束、主振荡功率放大等方法^[2],如图2所示。

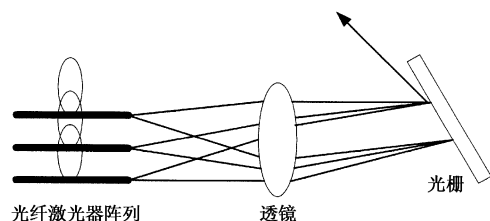


图1 非相干组束的基本结构

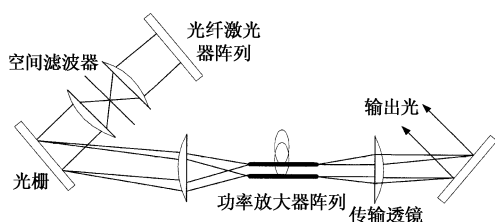


图2 主振荡功率放大结构图

3 非相干组束功率的实现

组束功率的高低同单根光纤的功率及组束个数密切相关。单根光纤的输出功率提高已相当困难,所以考虑增加组束个数以提高合成功率。若假设光纤激光器阵列的宽度为 W ,则 W 与传输透镜焦距 f 、组束波长宽度 $\Delta\lambda$ 、光栅色散 $d\beta/d\lambda$ 有关^[3],并具有如下关系:

$$W \approx f(d\beta/d\lambda)\Delta\lambda \quad (1)$$

光栅色散将衍射角的变化和组束波长的变化联系起来,并且与光栅沟槽间隔 d 以及衍射角 β 有关:

$$d\beta/d\lambda = 1/(d\cos\beta) \quad (2)$$

对于一个2000线/mm的光栅,在入射激光波长 $1\mu\text{m}$ 左右条件下的色散值约为 $4\text{rad}/\mu\text{m}$,若取传输透镜焦距 $f=100\text{cm}$,总的组束波长宽度 25nm ,则光纤激光器阵列宽度 W 约为 10cm 。假定每个组束光纤的中心间隔 Δd 为 $250\mu\text{m}$,这对于大模式面积双包层光纤来说已经足够了,那么最多可组束的光纤激光器阵列个数为400个。

单根光纤激光器的输出功率目前最高达到千瓦量级,几十瓦、几百瓦的输出相当普遍,这里我们假定单根光纤的输出功率只取 25W ,并且给定系统的组束的耦合效率为 70% ,那么组束后的输出功率为:

$$P = 400 \times 25 \times 70\% = 7 \times 10^3 \text{ W}$$

由此可见,利用非相干组束完全可以得到近 10kW 量级的合成功率,这一功率完全可以作为战术型激光武器,打击距离约为 $1\sim 2\text{km}$ 。并且随着单根光纤

激光器输出功率的提高,组束功率完全可以达到百千瓦甚至兆瓦量级,将组束后的光纤激光阵列用于机载自卫防御是可行的。

4 相干组束功率的实现

在相干组束过程中,令单根光纤激光的波数为 K ,其带宽为 $k=2\pi\Delta\lambda/\lambda^2$,单根光纤长度为 L 。那么单根光纤激光经过传输距离 L 含有的谱线个数为:

$$M_1 = kL \quad (3)$$

若参与组束的光纤个数为2,那么能够完成相干组束的是那些在经过传输距离 L 后仍然能够保持相位匹配的谱线,而对于相位失配的谱线,则不能完成相干组束,于是2个光纤激光组束的相位匹配模式数^[4]应该为:

$$M_2 = \frac{M_1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u[\cos(\varphi) - R] d\varphi \approx M_1 \frac{\sqrt{2(1-R)}}{\pi} \quad (4)$$

其中, u 是单位阶跃函数; φ 是为了达到相位匹配所需要的相移; R 是相干组束效率。

根据式(4)我们可以得到模式相位匹配概率,记为 P :

$$P = \frac{M_2}{M_1} = \frac{\sqrt{2(1-R)}}{\pi} \quad (5)$$

于是,对于 N 个组束光纤,可保持相位匹配的模式个数 M_N 应该为:

$$M_N = M_{N-1}P = M_1 P^{N-1} \quad (6)$$

在组束效率为 R 的条件下,能够完成相干组束的极限条件是 $M_N = 1$ 。根据式(3)和式(5)可得:

$$kLP^{N-1} = 1 \quad (7)$$

$$N = 1 + \frac{\lg(kL)}{\lg[\pi/\sqrt{2(1-R)}]} \quad (8)$$

值得注意的是,这是由极限条件 $M_N = 1$ 所给出的能够完成相干组束的最大光纤个数。实际上,当 $M_N = 1$ 时,虽然理论上相干组束仍然可以完成,但此时组束也已失去了其原有的意义,仅一个模式匹配的功率输出显然是没有任何意义的,也远远达不到机载软杀伤光源的功率需求。

对于光纤激光波长 $\lambda = 1557\text{nm}$, $\Delta\lambda = 0.6\text{nm}$,可计算出带宽 $k = 16\text{cm}^{-1}$,选取光纤长度为 30m ,选定相干组束效率为 60% ,那么根据式(8)简单计算得最大光纤组束个数为5。即使我们将光纤长度选为 3000m ,由于对数的存在,最大光纤组束个数也不过10。而目前单根光纤激光的输出功率一般为几十到几百瓦之间,显然,5~10根光纤激

光的相干组束功率输出远不能满足机载软杀伤光源的功率需求。

5 结 论

分别给出了光纤非相干和相干组束方法的组束个数,非相干组束方法可以实现几十到几百根的光纤激光合成,组束功率输出可以达到 10kW 量级,满足战术型激光武器的功率需求,是机载软杀伤光源的理想选择。而相干组束方法仅能实现几根光纤激光的功率合成,对于功率需求较高的战术激光武器光源,实用性较小。

(上接第 199 页)

参考文献:

- [1] Spence D E, Kean P N, Sibbet W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser[J]. Opt. Lett., 1991, 16(1): 42-44.
- [2] Keller U, Miller D A B, Boyd G D. Solid-saturable absorber for Nd:YLF laser; an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber[J]. Opt. Lett., 1992, 17(7): 505-507.
- [3] Giesen A, Hügel H, Voss A. Scalable concept for diode-pumped high-power solid state lasers[J]. Appl. Phys. B, 1994, 58(5): 363-372.
- [4] Kuznetsov M, Hakimi F, Sprague R. High power (>0.5 W cw) diode pumped vertical external cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM₀₀ beams[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1997, 9(8): 1063-1065.
- [5] Brovelli L R, Jung I D, Kopf D. Self-starting soliton mode-locked Ti:sapphire laser using a thin semiconductor saturable absorber[J]. Electron. Lett., 1995, 31(4): 287-289.
- [6] Jung I D, Brovelli L R, Kamp M. Scaling of the antiresonant Fabry-Perot saturable absorber design toward a thin saturable absorber[J]. Opt. Lett., 1995, 20(14): 1559-1561.
- [7] Tsuda, Knox W H, Souza E A. Low-loss intracavity AlAs/AlGaAs saturable Bragg reflector for femtosecond mode locking in solid-state lasers[J]. Opt. Lett., 1995, 20(12): 1406-1408.
- [8] Kopf D, Zhang G, Fluck R. All-in-one dispersion-compensating saturable absorber mirror for compact femtosecond laser sources[J]. Opt. Lett., 1996, 21(7): 486-488.
- [9] Chen Y F, Tsai S W, Lan Y P. Diode-end-pumped passively mode-locked high-power Nd:YVO₄ laser with a relaxed saturable Bragg reflector[J]. Opt. Lett., 2001, 26

参考文献:

- [1] 王戎瑞. 美国机载激光武器发展现状[J]. 激光与红外, 1999, 29(4): 195-196.
- [2] 李红艳, 任向军. 光束合成技术研究及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2002, 39(7): 22-23.
- [3] T Y Fan. Laser Beam Combining for High-Power High-Radiance Sources[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 573-574.
- [4] Dmitrii Kouznetsov. Limits of coherent addition of lasers: simple estimate[J]. Applied Physics A, 2003, 189(4): 1601-1602.
- [5] (4): 199-201.
- [10] Aus der Au J, Sphler G J, Sdmeyer T. 16. 2W average power from a diode-pumped femtosecond Yb:YAG thin disk laser[J]. Opt. Lett., 2000, 25(11): 859-861.
- [11] Innerhofer E, Südmeyer T, Brunner F. 60W average power in 810fs pulses from a thin-disk Yb:YAG laser[J]. Opt. Lett., 2003, 28(5): 367-369.
- [12] Brenner F, Südmeyer T, Innerhofer E. 240 fs pulses with 22 W average power from a mode-locked thin-disk Yb:KY(WO₄)₂ laser[J]. Opt. Lett., 2002, 27(13): 1162-1164.
- [13] Brunner F, Spühler G J, Aus der Au J. Diode-pumped femtosecond Yb:KGd(WO₄)₂ laser with 1.1W average power[J]. Opt. Lett., 2000, 25(15): 1119-1121.
- [14] Häiring R, Paschotta R, Gini E. Picosecond surface-emitting semiconductor laser with >200 mW average power[J]. Electron. Lett., 2001, 37(12): 766-768.
- [15] Hoogland S, Garnache A, Sagnes I. Picosecond pulse generation with 1.5 μ m passively modelocked surface-emitting semiconductor laser[J]. Electron. Lett., 2003, 39(11): 846-847.
- [16] Hoogland S, Dhanjal S, Tropper A C. Passively mode-locked diode-pumped surface-emitting semiconductor laser[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2000, 12(9): 1135-1137.
- [17] Aschwanden A, Lorenser D, Unold H J. 2.1 W picosecond passively mode-locked external-cavity semiconductor laser[J]. Opt. Lett., 2005, 30(3): 272-274.
- [18] Gamache A, Hoogland S, Tropper A C. Sub-500fs soliton-like pulse in a passively mode-locked broadband surface-emitting laser with 100 mW average power[J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 80(21): 3892-3894.
- [19] Lagatsky A A, Rafailov E U, Sibbett W. Quantum-dot-based saturable absorber with P-N junction for mode-locking of solid-state lasers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2005, 17(2): 294-296.