文章编号:1001-2486(2011)02-0028-05

多波长主动式相干合成中光程差对合成效果的影响*

韩 凯,许晓军,周 朴,马阎星,王小林
(国防科技大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:为了对多波长激光主动式相干合成做出初步的理论描述,揭示影响合成效果的关键因素,根据相干合成的基本原理,建立了计算模型。并以9波长7路相干合成系统为实例,仿真计算了光程差取不同值的情况下,各频率成分的合成效果和总体合成效果。当各路间存在较大的光程差时,只有中心频率成分实现了相干相长,其他频率成分处于"混乱"状态,总体合成效果退化到接近非相干合成的状态;各路间的光程差减小后,实现相干相长的频率成分增多,总体合成效果得到改善。在多波长主动式相干合成中光程差是影响合成效果的重要因素,要实现好的合成效果需先将光程差控制在较小的范围内,再进行锁相控制。

关键词:光纤激光;多波长主动式相干合成;光程差
中图分类号:TN248 **文献标识码**:A

Influence of Optical Path Difference on Combination Effect in Multi-wavelength Active Coherent Beam Combination

HAN Kai, XU Xiao-jun, ZHOU Pu, MA Yan-xing, WANG Xiao-lin
(College of Opto-electric Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to make a theoretical description of the multi-wavelength active coherent beam combination(CBC), and to figure out the significant factors influencing the combination effect, a mathematical model was established based upon the fundamentals of CBC. The combination effect of each frequency component and the whole combination effect are obtained on the calculation of the nine-wavelength seven-channel CBC example with various optical path differences. Only the central frequency component is coherently enhanced and the whole combination effect degenerates to non-coherent beam combination on the condition of large optical path difference. More components are coherently enhanced and the whole combination effect is improved when the optical path difference is small. The optical path difference is the key in multi-wavelength active CBC. To achieve excellent combination effect, the optical path difference should be adjusted to the same and then the phase of each channel is locked.

Key words: fiber laser; multi-wavelength active coherent beam combination; optical path difference

将多个光纤激光器的输出光束进行相干合成是获得高功率、高光束质量激光的有效途径[1-3]。在传统的主动式MOPA(Master Oscillator Power Amplifier)结构相干合成系统中,大都采用单频、单偏振的激光作为种子源,对各路光束进行锁相控制实现相干合成[1-4],然而单频的光纤激光器/放大器会受到受激布里渊散射(SBS)非线性效应的影响,输出功率有限,限制了相干合成的功率提升。在MOPA结构的光纤激光器中,种子源采用宽谱激光或者多波长激光,可以减轻光纤放大器中的SBS,提高光纤放大器的输出功率[5]。因此,宽谱线、多波长激光的相干合成较传统的相干合成具有巨大的功率提升潜力,有望成为相干合成的重要发展方向。

鉴于宽谱线、多波长激光在相干性方面与单频激光有所不同,宽谱线、多波长激光相干合成的可行性、合成效果的影响因素以及相应的控制策略等都与单频激光的相干合成有较大的不同,有待深入研究。事实上,基于MOPA结构的宽谱线、多波长激光的相干合成在业内受到了极大地关注,已有相关方面的报道[6],但报道中鲜有多波长激光相干合成的可行性分析和理论描述。本文从相干合成的基本原理出发,建立计算模型,通过对多波长相干合成实例的仿真计算,分析了光程差对多波长相干合成的影响,指出在多波长主动式相干合成中光程差是影响合成效果的重要因素,

* 收稿日期:2010-10-10
基金项目:国防科技大学优秀研究生创新基金资助项目(B080702)
作者简介:韩凯(1986—),男,博士生。

决定了实现有效相干的波长的数目,各路间的光程差控制得越小,就能够使越多的波长成分实现相干相长,相干合成效果越好。

1　计算模型

在多波长主动式相干合成中,主振荡器/种子源(master oscillator)发出的光束包含多个频率成分,以 $\nu_1,\nu_2,\cdots,\nu_N$ 描述,中心频率记为 ν_0,频率为 ν_n 的成分的相对强度系数表示为 $a(\nu_n)$,若各个频率成分的强度均相等,则表示为 $a(\nu_n)=1$ $(n=1,2,\cdots,N)$。种子光经过分束器(splitter)后均分为 M 路,经过相位调制器(phase modulator)与放大器(amplifier)后被调制、放大,每一路中均含有 N 个频率成分。M 路光束通过准直器(collimator)输出后,在远场相干叠加。假设各路中对各个频率成分的放大倍数均相同,这样远场合成光束中频率为 ν_n 的成分的相对强度系数仍然可用 $a(\nu_n)$ 表示。图 1 是一个典型的基于 SPGD 算法的多波长多路主动式 MOPA 结构相干合成的示意图。

假设各路出射的光束为基模高斯光束,这样第 m 路中第 n 个频率成分 ν_n 的复振幅[9]可表示为式(1)。

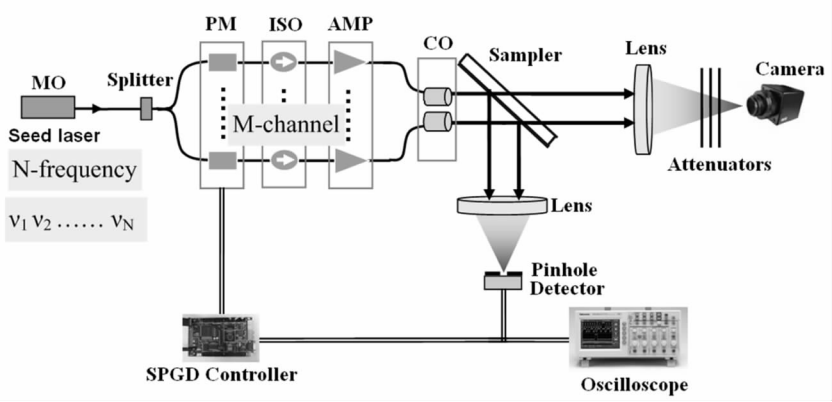


图 1　多波长主动式相干合成系统结构

Fig.1　Typical configuration of multi-wavelength active coherent beam combination

$$E_{m,\nu_n}(x,y)=\sqrt{a(\nu_n)}\,\frac{\omega_0}{\omega_{\nu_n}(Z)}\exp\left(-\frac{(x-x_m)^2+(y-y_m)^2}{\omega_{\nu_n}^2(Z)}\right)\cdot\exp\left\{-\mathrm{j}\left[\frac{2\pi}{c}\nu_n\left(Z+l_m+\frac{(x-x_m)^2+(y-y_m)^2}{2R_{\nu_n}(Z)}\right)-\varphi_{0\nu_n}+\varphi'_{m,\nu_n}\right]\right\}\tag{1}$$

其中,$\sqrt{a(\nu_n)}$ 代表频率为 ν_n 的频率成分的相对强度系数;$Z+l_m$ 代表第 m 路中的光束经历的总光程,Z 为光束从准直系统出射后在空间自由传播的光程,l_m 为光束在各放大链路中经历的光程 $(Z\gg l_m)$;ω_0 表示高斯光束的腰斑半径;相应的 $\omega_{\nu_n}(Z)=\omega_0\cdot\sqrt{1+(Z/Z_{0\nu_n})^2}$ 表示第 m 路中频率为 ν_n 的频率成分在观察面上的半径;$R_{\nu_n}(Z)=Z+Z_{0\nu_n}^2/Z$,表示第 m 路中频率为 ν_n 的频率成分在观察面上的波前曲率半径;$Z_{0\nu_n}$ 为频率为 ν_n 的频率成分的瑞利长度且 $Z_{0\nu_n}=\pi\cdot v_n\cdot\omega_0^2/C$,$C$ 为光速;$\varphi_{0\nu_n}=\arctan(Z/Z_{0\nu_n})$,表示附加相移;$\varphi'_{m,\nu_n}$ 为第 m 路中频率为 ν_n 的频率成分的相位噪声;(x,y) 为观察平面上的坐标,(x_m,y_m) 为出射平面上第 m 路光束中心的坐标。

相干合成本质上是由于光束的干涉效应引起光场的能量的重新分布。通常认为各路光束中同频率的成分相干叠加,不同频率的成分非相干叠加[7]。这样,在观察平面上合成光束中频率为 ν_n 的频率成分的复振幅便表示为

$$E_{\nu_n}(x,y)=\sum_{m=1}^{M}E_{m,\nu_n}(x,y)\tag{2}$$

ν_n 频率成分的光强为

$$I_{\nu_n}(x,y)=E_{\nu_n}(x,y)\times E_{\nu_n}^{*}(x,y)\tag{3}$$

观察平面处合成光束的总强度为各个频率成分的光强之和[7]

$$I(x,y)=\sum_{n=1}^{N}I_{\nu_n}(x,y)\tag{4}$$

在一个 N 波长 M 路 MOPA 结构的主动式相干合成系统中,各频率成分的强度分布 $I_{\nu_n}(x,y)$ 和合成光束总的强度分布 $I(x,y)$ 可由式(1)~(4)得到。

2 仿真计算与分析

根据计算模型式(1)~(4),以 9 波长 7 路相干合成系统为例进行计算。9 波长光束的中心波长设为 $\lambda_0 = 1064\text{nm}$,相应的中心频率为 $\nu_0 = 2.82 \times 10^{14}\,\text{Hz}$;9 个频率的间隔 $\mathrm{d}v$ 与受激布里渊频移在同一量级,设为 3GHz;9 个频率成分强度相等,即:$a(\nu_1) = a(\nu_2) = \cdots = a(\nu_9) = 1$,如图 2;$z$ 取为 10km,ω_0 为 5mm,相应的计算得到 $Z_{0\nu_n}$、$\omega_{\nu_n}(Z)$、$R_{\nu_n}(Z)$、$\varphi_{0\nu_n}$、r,相位噪声 φ'_{m,ν_n} 随机取得,7 路光束排列为圆形,各光束中心间隔约为 13mm,如图 3。另设各路之间依次存在着 Δl 的光程差,即 $\Delta l = l_{m+1} - l_m (m = 1,2,\cdots,6)$。

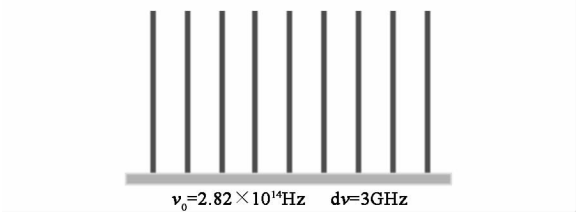


图 2 9 波长 7 路相干合成实例的光谱
Fig.2 The spectrum of the nine-wavelength seven-channel CBC example

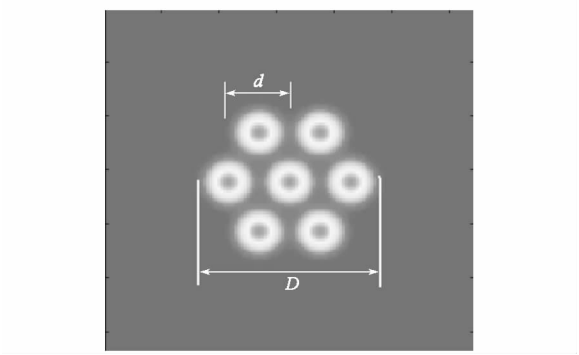


图 3 9 波长 7 路相干合成实例的近场光场分布
Fig.3 The near-field intensity distribution of the nine-wavelength seven-channel CBC example

在上述参数值下,根据式(1)~(4)便可计算得到远场的光强分布 $I(x,y)$。进一步采用 SPGD 算法,对光程 $l_1, l_2, \cdots, l_7$ 进行优化控制,以期得到好的相干合成效果。在迭代控制中以远场桶中功率值(PIB)作为评价函数 $J(l_1, l_2, \cdots, l_7)$[8],每次迭代对光程$(l_1, l_2, \cdots, l_7)$进行扰动优化,将改进的光程值$(l_1, l_2, \cdots, l_7)$代入式(1)-(4)再次得到远场光斑分布,然后计算得到评价函数 $J(l_1, l_2, \cdots, l_7)$,这样反复迭代,对光程$(l_1, l_2, \cdots, l_7)$进行反复的扰动优化,使评价函数向着增大的方向收敛,经过有限次迭代便可得到评价函数的最优值和主动控制后的远场光斑图样[4]。值得注意的是,在实际的相干合成系统中,采用 $LiNbO_3$ 晶体作为相位调制器,通过对 $LiNbO_3$ 晶体施加扰动电压,实现对光程的优化控制(光程的改变量与电压近似成正比关系)。通常来说,对光程的控制量十分有限,在亚微米量级,控制后的光程差 Δl 变化也在亚微米量级,能够实现锁相控制,可以将各路中由相位噪声造成的相位差控制到零,但无法改变各路间的光程差。在用 SPGD 算法根据式(1)~(4)对两个实例进行仿真计算时,控制参数选取贴近实际情况。根据式(1)~(4)分别仿真计算 Δl 为 1cm、0.3cm 和 0.1cm 的情况下,采用 SPGD 算法进行锁相控制,各个频率成分 $I_{\nu_n}(x,y)$ $(n = 1,2,\cdots,9)$在远场形成的光斑图样和总的光斑图样 $I(x,y)$。

当各路间的光程差较大,依次存在着 1cm 的光程差时,经过 SPGD 优化算法锁相控制后,合成光束中各个频率成分的远场光斑图样 $I_{\nu_n}(x,y)$ $(n = 1,2,\cdots,9)$和总的光斑图样 $I(x,y)$ 分别如图 4、图 5 所示。

图 4 表明当各路间顺次存在的光程差比较大时(Δl = 1cm),在 9 波长相干合成中,经过 SPGD 优化算法锁相控制,只有中心频率(v_5)成分能够实现相干相长,其他的频率成分无法达到相干增强。9 波长 7 路合成的整体效果也很差(图 5)。

各路间的光程差变小,各路之间依次存在着 0.3cm 的光程差时,经过 SPGD 优化算法锁相控制后,合成光束中各个频率成分的远场光斑图样 $I_{\nu_n}(x,y)$ $(n = 1,2,\cdots,9)$和总的光斑图样 $I(x,y)$ 分别如图 6、图 7 所示。

各路间顺次存在的光程差减小到 0.3cm 时,经过锁相控制,在 9 波长相干合成中实现相干相长的频率成分增多,中心频率(v_5)及其邻近的频率成分都实现了相干相长,距离中心频率较远的频率成分仍然没有达到相干相长。9 波长 7 路合成的整体效果有所改善,但仍有提高的空间。

当各路间的光程差较小,依次存在着 0.1cm 的光程差时,经过 SPGD 优化算法锁相控制后,合成光束中各个频率成分的远场光斑图样 $I_{\nu_n}(x,y)$ $(n = 1,2,\cdots,9)$和总的光斑图样 $I(x,y)$ 分别如图 8、图 9 所示。

各路间顺次存在的光程差减小到 0.1cm 时,锁相控制后 9 波长相干合成实例中所有的频率成分均实现了相干相长。9 波长 7 路合成的整体效果大大改善。

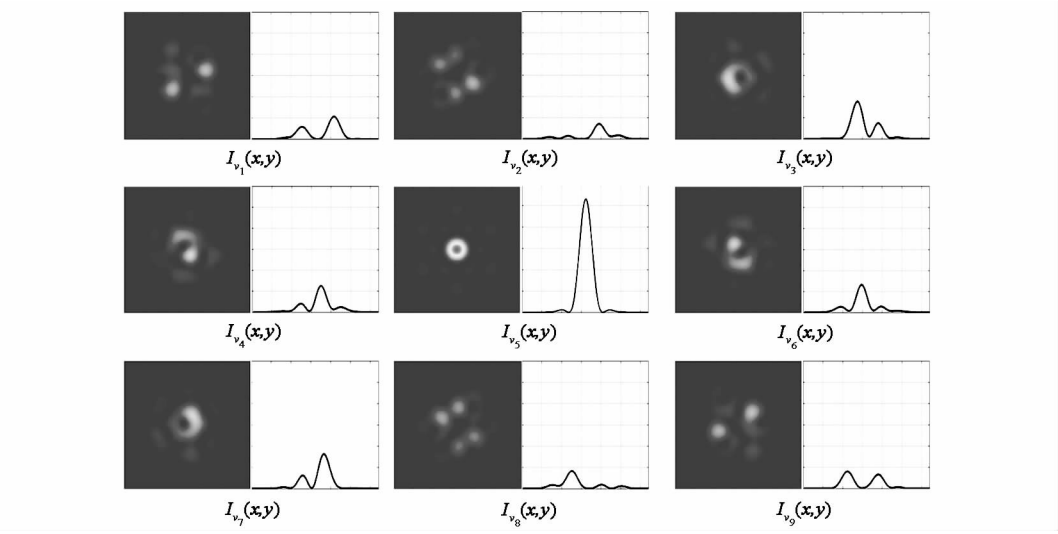


图 4　Δl = 1cm 时各频率成分远场光强图样

Fig.4　The far-field intensity distribution of each frequency component on the condition of Δl = 1cm

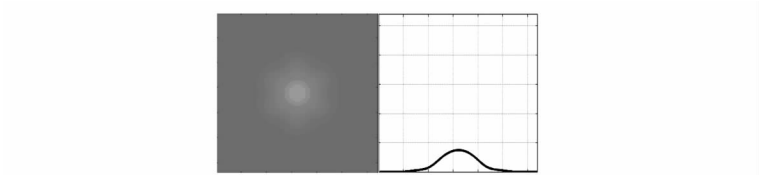


图 5　Δl = 1cm 时总的远场光强图样

Fig.5　The whole far-field intensity distribution on the condition of Δl = 1cm

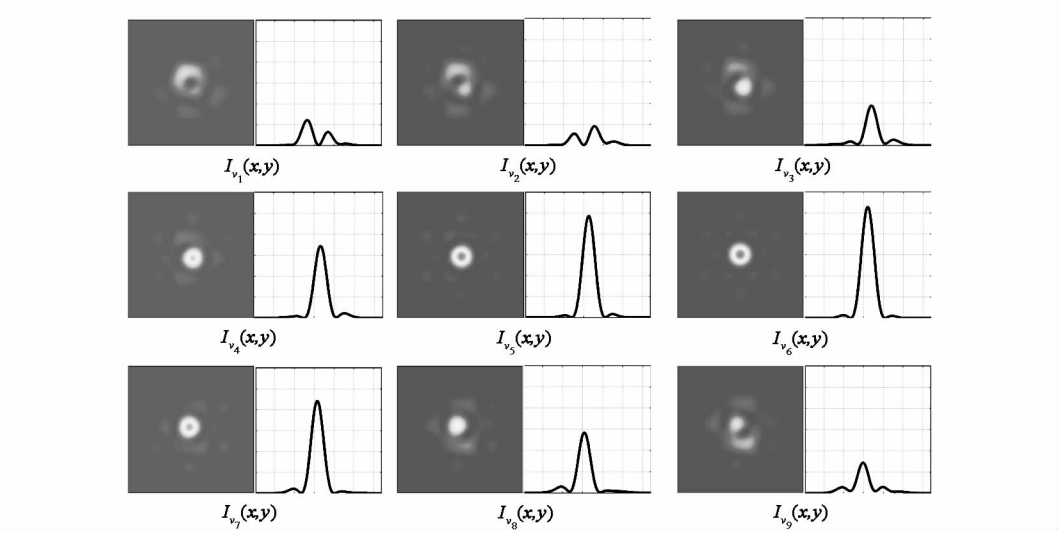


图 6　Δl = 0.3cm 时各频率成分远场光强图样

Fig.6　The far-field intensity distribution of each frequency component on the condition of Δl = 0.3cm

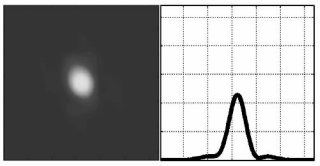


图 7　Δl = 0.3cm 时总的远场光强图样

Fig.7　The whole far-field intensity distribution on the condition of Δl = 0.3cm

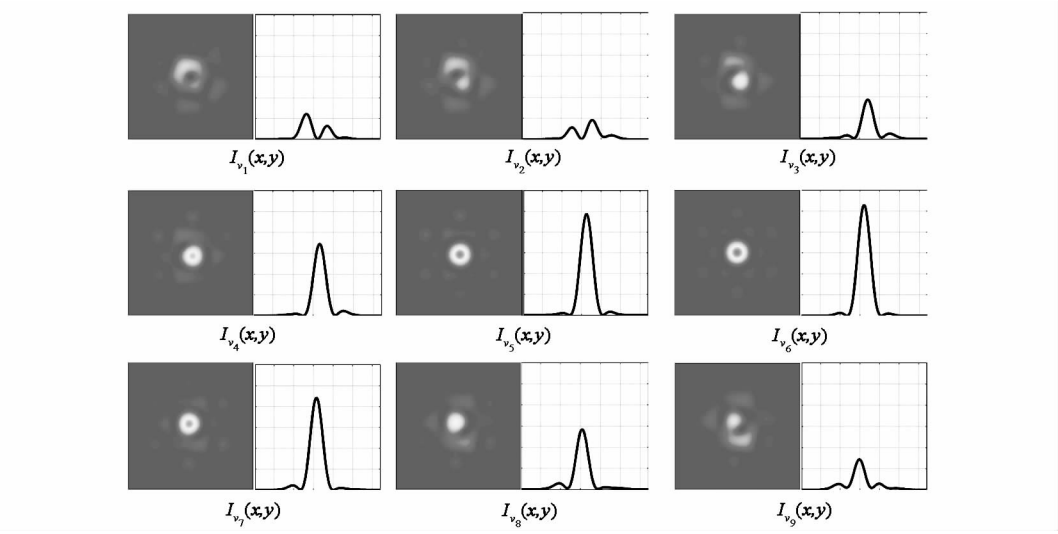


图 8 $\Delta l = 0.1$cm 时各频率成分远场光强图样

Fig.8 The far-field intensity distribution of each frequency component on the condition of $\Delta l = 0.1$cm

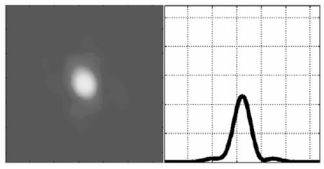


图 9 $\Delta l = 0.1$cm 时总的远场光强图样

Fig.9 The whole far-field intensity distribution on the condition of $\Delta l = 0.1$cm

另外,相干合成的意义在于增加远场靶面功率的同时保持良好的光束质量。若以远场功率的半高宽度(FWHM)来衡量光束质量,理想的相干合成状态下远场功率半高宽度由出射面上 7 路光束拼成的大口径(D)决定,即:

$$\mathrm{FWHM} = \lambda / D \times Z \tag{5}$$

非相干合成远场功率半高宽度由出射面上每一路光束的口径(d)决定[9],即:

$$\mathrm{FWHM} = \lambda / d \times Z \tag{6}$$

在 9 波长 7 路相干合成实例中,每路光束的口径 $d = 10$mm,7 路光束拼接成的大口径 $D \approx 36$mm,如图 3 所示。这样,在仿真实例给出的参数下便可依据式(5)、式(6)计算得到理想的相干合成情况下,光束质量半高宽度为 0.296m,非相干合成情况下,光束质量半高宽度为 1.064m。仿真计算结果表明,光程差 Δl 取值为 1cm、0.3cm、0.1cm 时,9 波长 7 路相干合成的光束质量半高宽度分别为 0.730cm、0.344cm、0.302cm。这说明在多波长相干合成中,只有当光程差较小时才能实现真正意义上的相干合成;当光程差比较大时控制策略无法兼顾所有的频率成分,只有中心频率实现了相干相长,其他许多频率成分仍处于"混乱"状态,合成光束质量退化到接近非相干合成时的情形,相干合成也就失去了意义。光程差对相干合成效果有着重大影响,这是多波长相干合成相对于单频相干合成表现出来的特点。

3 结 论

依据多波长相干合成的基本理论模型和 SPGD 优化算法,分析了 9 波长 7 路相干合成实例的合成效果。当各路间顺次存在较大的光程差时($\Delta l = 1$cm),只有中心频率实现了相干相长,其他频率成分均处于"混乱"状态,整体的合成效果严重退化,接近非相干合成时的情形;各路间的光程差减小($\Delta l = 0.3$cm),实现相干相长的波长数目增多,整体的合成效果也有所改善;各路间的光程差较小($\Delta l = 0.1$cm),才能在同一的控制方式下"兼顾"所有的频率成分,实现真正意义上的相干合成。与单频相干合成不同,各路间的光程差会对多波长相干合成的效果产生重大影响。因此,在多波长激光主动式相干合成中,应当首先尽可能地使各个放大链路光程相等,减小光程差,再实施锁相控制,否则相干合成将失去意义。事实上,在多波长相干合成中,各路之间允许存在的光程差与种子激光的光谱结构、相干合成的路数、控制方式紧密相关,在 9 波长 7 路合成实例中,各路间的光程差 Δl 在 0.1cm 以下即可。在实际操作中,通过光纤切割、熔接,跳线连接等方式对各路光程进行较为精确的控制,可以将各路间的光程差控制在 0.1cm 以下[10]。

(下转第 59 页)

Phenomenon, Model and Simulation Study[J]. IEEE Trans. on AES, 2006, 42(1): 2 – 21.

[4] Chen V C, Ling H. Time-frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis[M]. Boston, London: Atech House, 2002.

[5] Chen V C, Li F, Ho S, et al. Analysis of Micro-doppler Signatures [J]. IEE Proc. Radar Sonar Navig., 2003, 150(4): 271 – 276.

[6] Chen V C. Micro-Doppler Effect of Micro-motion Dynamics[C]//A Review, Proc. of SPIE, 2003, 5102: 240 – 249.

[7] Chen V C. Analysis of Radar Micro-doppler Signature with Time-frequency Transform[C]//Proc. of the 10th IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing, 2000: 463 – 466.

[8] 王涛. 弹道中段目标极化域特征提取与识别[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.

[9] 马梁, 王涛, 冯德军, 等. 旋转目标距离像长度特性及微运动特征提取[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2273 – 2279.

[10] 高红卫, 谢良贵, 文树梁, 等. 摆动锥体目标微多普勒分析和提取[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2497 – 2502.

[11] Lovett A, Shen C, Otaguro W. Microdoppler: Non-cooperative Target Classification/Identification[R]. A420040, AD, Naval Air Warfare Center Aircraft Division, Maryland, USA, 2004.

[12] Gschwendtner A B, Keicher W E. Development of Coherent Laser Radar at Lincoln Laboratory[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2000, 12(2): 383 – 396.

[13] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论[M]. 北京: 国防工业出版社 1984: 120 – 122.

[14] 张毅, 等. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社 2005: 2 – 4, 174 – 175.

(上接第 32 页)

参 考 文 献:

[1] Fan T Y. Laser Beam Combining for High-power, High—radiance Sources [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 567 – 577.

[2] 侯静, 肖瑞, 姜宗福, 等. 三路掺镱光纤放大器的相干合成实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(10): 1585 – 1588.

[3] 肖瑞, 侯静, 姜宗福, 等. 三路光纤放大器相干合成技术的实验研究[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6464 – 6469.

[4] Zhou P, Liu Z J, Wang X L, et al. Coherent Beam Combination of Two-dimensional High Power Fiber Amplifier Array Using Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm [J]. Applied Physics Letter, 2009, 94: 231106.

[5] Dajani I, Zeringue C, Shay T. Investigation of Nonlinear Effects in Multitone-driven Narrow-linewidth High Power Amplifiers [J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 2009, 15: 406 – 414.

[6] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, et al. Coherent Beam Combination of Three Two-tone Fiber Amplifiers Using Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm[J]. Optics Letters, 2009, 34(19): 2939 – 2941.

[7] Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. New York: Cambridge University Press, 1999: 259 – 286.

[8] Zhou P, Liu Z J, Xu X J, et al. Beam Quality Factor for Coherently Combined Fiber Laser Beams[J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41: 268 – 271.

[9] 季家镕. 高等光学教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[10] Burnett J G, Jones J D C. Cutting Optical Fibers to Equal Lengths for Broadband Stellar Interferometry[J]. Appl. Opt., 1992, 31: 2977 – 2978.