

自由空间光通信系统中光源制备方案研究

黄春晖, 王超

(福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350116)

摘要: 利用单模光纤分路器和角锥棱镜构建了一个由径向阵列高斯光束制备平顶光的光学系统。该系统利用角锥棱镜的固有相干合成特性和谐振腔的非线性特性, 保证了光束间的相位同步。分析了填充因子、腰束半径对合成光的光强分布的影响。根据自由空间光通信(FSO)长距离传播的需求, 提出了环比功率作为合成平顶光质量的评价标准。进一步利用遗传学(GA)算法, 优化合成平顶光的性能参数, 保证合成平顶光具有小发散角、高能量集中度的优点。

关键词: 自由空间光通信; 角锥棱镜; 遗传算法; 平顶光

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)02-0035-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.02.011

Research on the optical source preparation scheme in free space optical communication system

HUANG Chunhui, WANG Chao

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350106, China)

Abstract: To prepare a flat-topped beam by radial array Gaussian beams, a single-mode fiber splitter and a corner cube prism are used to set up an optical system in this paper. Taking advantage of the coherent combining property of corner cube prism and nonlinear characteristics of cavity resonator in our system, it was ensured that phase synchronization between beams. The relationship between the filling factor and the waist radius is analyzed. As the needs for long distance propagation based on free space optical communications (FSO), the relative power ratio is proposed as the evaluation standard of flat-topped beam quality. Then the Genetic Algorithm (GA) is joined to optimize the coherent combining parameters of flat-topped beam, it ensures that the flat-topped beam has the advantages of small divergence angle and high energy concentration.

Key words: free space optical communication; corner cube prism; genetic algorithm; flat-topped beam

0 引言

目前自由空间光通信(FSO)已经应用到星地通信及深空探测等领域, 随着应用的发展, 要求光束具有小的发散角、优越的光强分布特性和灵活的调制, 以适应光信号编码、长距离传输和抵御大气各种干扰等特性。传统高斯光束的功率很难满足通信需求, 而且在传输过程中的复杂大气环境下还会带来严重的损耗^[1], 但通过多光束合成可以获取大功率、高质量的光

源^[2]。因此, 通过光合成制备平顶光就能很好地满足以下几点要求: 用多光束合成平顶光不仅具有发散小、横截面的光强分布均匀等特性, 而且还可以通过调制合成过程使出射光功率宽幅变化满足编码需要; 调整出射光的偏振度和相干度, 提高光束在大气传播时的抗湍流抗干扰能力^[3]。

本文以光通信为应用背景, 提出一种多光束相干合成平顶光的方案。方案中利用角锥棱镜的固有相干合成特性^[4], 通过角锥谐振腔实现互注入光束间的相位同步, 克服多光束合成存在的束间随机性相位差带来的影响, 并且通过改变束间距离和束腰半径等参数来优化合成光场质量。

收稿日期: 2017-10-14。

基金项目: 国家自然科学基金(61177072)资助。

作者简介: 黄春晖(1959-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事量子通信与集成电路方面的教学和研究。

1 基于角锥互注入相干合成平顶光模型

图 1(a)是我们提出的用角锥互注入相干合成产生平顶光的光学系统示意图,单一激光束通过单模光纤耦合器和光纤分束器均匀地分成 6 束等间距的宽度相同的高斯光束,高斯光束阵列分布如图 1(b)所示。

系统采用光纤激光相干合成方式获取平顶光,充分利用了光纤激光的高质量输出光、高稳定性和高激发性的优点,但由于环境的复杂性导致温度的变化会造成光纤激光输出相位的波动,这样无法保证有效合成平顶光。对多光束相干合成相位控制一般采用主动锁相^[5]和被动锁相^[6]。主动锁相每个光纤激光器都需要一个单独的相位控制器和补偿装置,系统复杂不适用于多光纤相干合成,而且采用的是后验补偿的方式,会降低光通信系统的可靠性。被动锁相则通过光束间的倏逝波的耦合、非线性效应来构建一个自适应系统,避免了主动锁相的系统复杂性。本文的相干互注入平顶光合成系统采取被动锁相的方式,利用图 1(a)所示的角锥棱镜构建谐振腔,使角锥棱镜的对称光束实现部分互注入锁相、相邻光束间的倏逝波耦合锁相获取自组织的同相相干输出^[4]。

系统中采用高消光比的偏振分光棱镜(PBS),其 P 光的透过率大于 96%,S 光的反射率大于 99.5%。初始光束经光纤分束产生 6 束光,6 束光经过偏振片都以 S 光输出,S 光经过 PBS 反射注入到角锥腔,S 光会经过角锥棱镜部分转化为 P 光;P 光透过 PBS 在角锥谐振腔里相干互注入,然后一部分 P 光转化为 S 光输出。6 束光经过角锥谐振腔的相干互注入,实现出射光束间的相位同步,使近程光场的强度分布具有平顶光束特征,其稳定的出射光场分布如图 1(b)所示。设阵

列光经过角锥谐振腔射出的平面为 $z=0$,则光场表达式为:

$$u_0(x, y, 0) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp[-((x-d\cos\theta_n)^2 + (y-d\sin\theta_n)^2)/w_0^2] \exp(i\Delta\varphi_n) \quad (1)$$

其中,每束高斯光束的中心坐标与坐标原点的连线和 x 正轴的夹角为 $\theta_n = n\alpha_0 (n=0, 1, 2, \dots, N)$, $\Delta\varphi_n$ 表示第 n 束光的初始相位, d 表示光束间的距离, w_0 表示腰束半径。

2 菲涅尔近似下合成光的传输特性

由角锥互注入相干光合成模型,初始光场可由式(1)获得,结合广义的惠更斯-菲涅尔原理可以得到光束在大气传播中的光场分布:

$$u(x_z, y_z, z) = \frac{\exp(2i\pi z/\lambda)}{i\lambda z} \iint_{\Sigma} u_0(x, y, 0) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z} [(x-x_z)^2 + (y-y_z)^2]\right\} dx dy \quad (2)$$

其合成光的光场表达式为:

$$I(x_z, y_z, z) = \frac{1}{2} |u(x_z, y_z, z)|^2 \quad (3)$$

径向阵列高斯光束的相位保持同步的条件下,部分阵列光的能量在中心轴上叠加,很快地合成一束光。其光束呈现出平顶分布特性,相干合成的平顶光扩散角小,能量分布均匀,对复杂的大气环境有着较强的抗干扰能力,并且通过 6 束光相干合成可以获取的功率更大,是作为远距离光通信的理想光源。

在光束的传播过程中,合成光的光强分布会受到填充因子($\rho=w_0/d$)^[7]、腰束半径(w_0)的影响。在腰束半径不变的情况下,当填充因子太小时,光束间的作用力

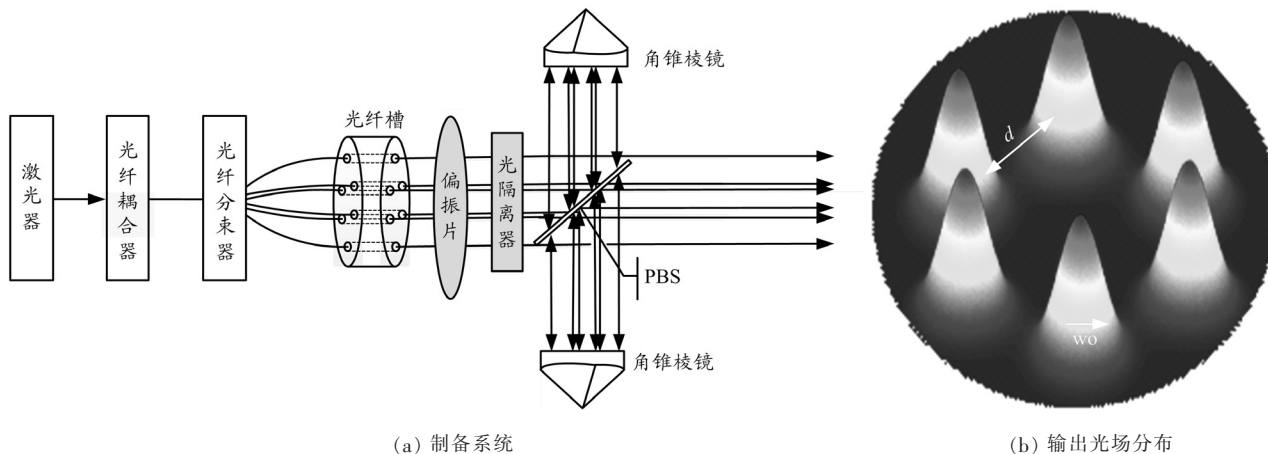


图 1 平顶光制备系统

太弱,能量发散,轴上叠加的能量太少,无法有效合成平顶光。但是,随着填充因子的增加,光束间的作用力变强,能量向着中心集中,阵列光的自耦合能力越好,当填充因子 $\rho > 0.6$ 时,可以有效合成平顶光。在填充因子保持不变的情况下,腰束半径决定了合成平顶光的光束直径,随着腰束半径的增大,合成光光束直径随之增大。

3 相干合成平顶光的质量评价标准

以上我们对填充因子、腰束半径对合成光的光强分布进行了讨论。为了进一步合成高质量的平顶光,需要对于合成光质量和合成效果进行评价,这是光合成系统设计的关键。目前,对合成光的评价主要有 M^2 因子^[8]、光束质量 β 因子^[9]、斯特列尔比^[10]、环围功率比^[11]和光束传输因子^[12]。其中, M^2 因子适用于高斯光束的评价,对平顶光进行评价容易产生误判;斯特列尔比主要是对峰值功率的考虑;由于合成光束整体外形很难确定,采用 β 因子会出现很大的误差。这些都是以提高合成光的能量和功率为目的的评价方式。本文提出的相干互注入平顶光系统是为了更好地应用到远距离通信系统中,在考虑能量集中度的同时还要考虑平顶光束的发散角和实际测量的可行性。

图2为阵列高斯光束排列方式,其中 D 为合成光束的直径, d 为光束间的距离。本文根据阵列光的分布形式提出环比功率作为合成平顶光的评价标准:

$$R_{CP} = \frac{P_{\text{center}}}{P_{\text{total}}} = \frac{\int\limits_{x^2+y^2 \leq d} I(x, y, z) dx dy}{\int\limits_{x^2+y^2 \leq D} I(x, y, z) dx dy} \quad (4)$$

其中, $D=d+w_0$ 为合成光的直径。在光源的探测面分别添加相应尺寸的光阑,可以非常方便地进行测量计算。

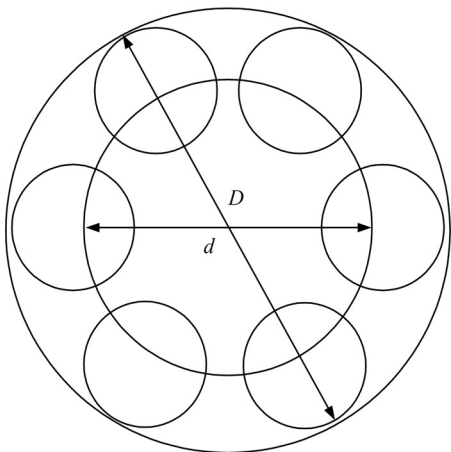


图2 高斯阵列光束

4 遗传学算法下的参数优化

以上通过讨论填充因子、腰束半径和合成光光强分布的关系,确定了有效合成平顶光的条件:填充因子 $\rho > 0.6$ 。根据式(4)定义的合成平顶光的评价标准,可以通过遗传算法^[13]来搜索获得优化参数。遗传算法是一种启发式的最优解搜索算法,基本思想是按照适应度值选择优良个体交叉变异来产生下一代,然后一代代往下传,是一种随机化的搜索方法。本文结合实际应用需求构建遗传算法,具体步骤如下:

①利用随机函数产生由 K 个个体组成的群体: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_K\}$ 。其中,每个个体 $x_n = \{w_n, \rho_n\}$,对输入量的编码,假设 $x_{n0} = w_n, x_{n1} = \rho_n$ 。将变量 x_{nm} 转化为长度为 len_m 的二进制代码串 C_{nm} ,则它们之间的转化关系为:

$$x_{nm} = x_{nm}^{\min} + \frac{x_{nm}^{\max} - x_{nm}^{\min}}{2^{len_m} - 1} \sum_{k=1}^{len_m} 2^{k-1} (C_{nm})_k, (m=0, 1) \quad (5)$$

其中 $x_{nm}^{\min}$ 、 $x_{nm}^{\max}$ 分别表示腰束半径和填充因子的最小值和最大值,此处腰束半径取值范围为 $1.5\text{mm} \leq w_0 \leq 2.5\text{mm}$ 。理论上填充因子 ≤ 1 ,但实际中填充因子很难取到1,而且填充因子太小时,光束间作用太弱而无法相干合成平顶光,于是本文填充因子取值范围为 $0.6 \leq \rho \leq 0.8$ 。

②将每个个体 $x_n = \{w_n, \rho_n\}$ 代入式(3)、式(4),计算得到半腰功率比 P 值,将其作为这个个体的适应度值。利用得到的适应度值对个体进行评价,适应度值越大个体优良性越好。

$$P_{sn} = \frac{P_n}{\sum_{j=0}^K P_j} \quad (6)$$

其中,选择概率 P_{sn} 为第 n 个个体的适应度在群体适应度总和中所占的比例。个体适应度越高,其被选择概率越高。交叉算法中随机地选择两个个体进行交叉运算,其具体的实现过程为线性组合的过程,例如 x_n 和 x_k 进行交叉运算产生新的个体就为 $x_n^1 = px_n + (1-p)x_k$ 和 $x_k^1 = px_k + (1-p)x_n$,其中 p 是一个介于 $0 \sim 1$ 的常数。变异算法对一个选定的基因,利用随机函数产生一个数来取代它。整个交叉变异过程的实质是利用交叉算法产生最优解临域,然后利用变异算法加速随机搜索的最优解收敛,最终收敛结果如图3所示

图3表明,随着群体的不断进化,适应度值不断增长直至饱和,这是实现合成平顶光的一个不断优化过程。图3(a)为不断进化过程中,适应度值的不断增长过程,图3(b)从左至右分别代表遗传代数分别为7、20、40时

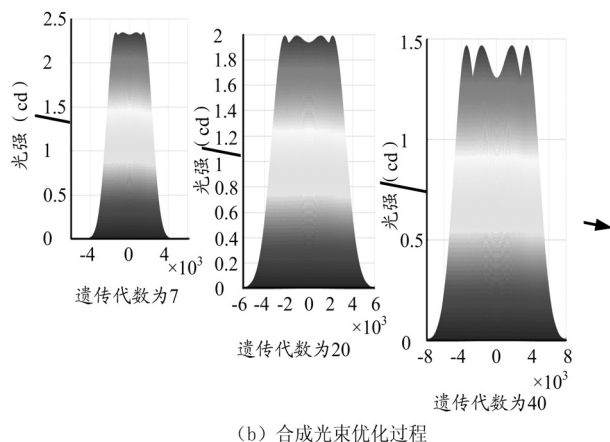
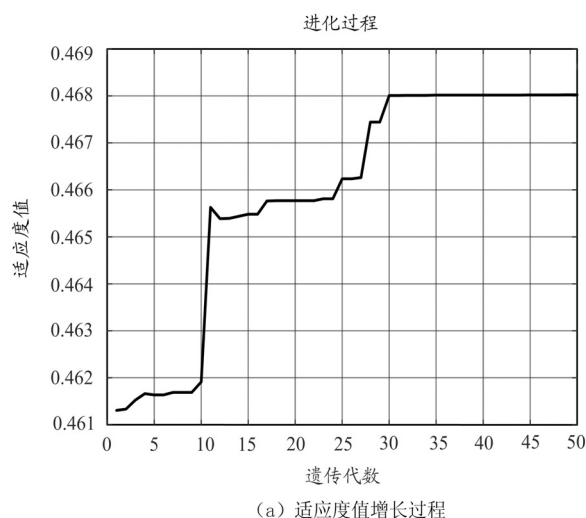


图3 遗传算法寻优过程

合成光束的分布情况。最终得到个体的适应度值为46.8%,填充因子取值为0.61,腰束半径为2.4mm。此时,合成平顶光的发散角更小,中心能量集中,能很好地满足自由空间光长距离通信的需求。

5 结束语

本文提出了一种基于角锥谐振腔相干互注的合成平顶光系统,系统的光合成效率高,灵活性强。本系统的设计利用光纤激光的高稳定性和角锥谐振腔的互注入锁相特性,使多光束合成平顶光很好地满足了自由空间光远距离通信的功率要求。我们通过分析填充因子、腰束半径和合成光光强分布的影响,确定了合成平顶光的条件,并提出了环比功率作为合成光束评价标

准,其物理意义清晰,在实际测量中易获取。我们还利用了遗传算法,将环比功率作为衡量标准,优化系统设计中的相关参数,当填充因子为0.61、腰束半径为2.4mm时,合成的平顶光的发散角更小,能量也比较集中,是自由空间光远距离通信的理想光源。本文的研究结果对自由空间光远距离通信的光源制备方案设计,有着指导和现实意义。

参考文献:

- [1] ANBARASI K, HEMANTH C, SANGEETHA R G. A review on channel models in free space optical communication systems [J]. Optics Laser Technology, 2017(97): 161–171.
- [2] GENG C, ZHAO B, ZHANG E, et al. 1.5 kW Incoherent Beam Combining of Four Fiber Lasers Using Adaptive Fiber-Optics Collimators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(13): 1286–1289.
- [3] XU Y, TIAN H, YANG T, et al. Propagation characteristics of partially coherent flat-topped beams propagating through inhomogeneous atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 2017, 56(10): 2691–2691.
- [4] 朱孟真, 万强, 刘旭, 等. 角锥腔固体激光器相干特性的研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 142–148.
- [5] HE B, LOU Q, WANG W, et al. Experimental demonstration of phase locking of a two-dimensional fiber laser array using a self-imaging resonator[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(25): 1115–1117.
- [6] KABEYA D, KERMENE V, FABERT M, et al. Active coherent combining of laser beam arrays by means of phase-intensity mapping in an optimization loop[J]. Optics Express, 2015, 23(24): 31059–31059.
- [7] 谭毅, 李新阳. 光束相干合成中填充因子对远场光强分布的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 094202–094211.
- [8] VAVELIUK P. Quantifying the paraxiality for laser beams from the M2 factor[J]. Optics Letters, 2009, 34(3): 340–340.
- [9] 李震, 周军, 薛宇豪, 等. β 因子用于被动相干组束系统光束质量评价的探讨[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 70–74.
- [10] 韩立强, 王志斌. 自适应光学校正下空间光通信的光纤耦合效率及斯特列尔比[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 125–129.
- [11] 陈鸿, 季小玲. 环状光束沿斜程路径大气湍流传输的光束扩展[J]. 中国激光, 2015(11): 207–212.
- [12] 刘泽金, 周朴, 许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 773–778.
- [13] LEUNG Y W, WANG Y. An orthogonal genetic algorithm with quantization for global numerical optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 5(1): 41–53.

欢迎投稿

欢迎订阅