

·激光技术·

一种基于光纤激光相控阵技术的全光组网的新方法

许磊^{1,2}, 马万卓^{1,3}, 李鑫²

(1. 长春理工大学 空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 长春 130022; 2. 长春理工大学 理学院, 长春 130022;
3. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘要: 提出采用光纤激光相控阵光源在深空通信中组成全光组网的新方法, 模拟了 1.55 μm 的光纤激光相控阵光源在深空通信中的远场相对光强图, 得到了通过改变阵元之间的相位控制扫描角度, 阵元数目为 2×2 , 波长为 1.55 μm , 纤芯半径为 10 μm , 阵元在间距 80 μm 时, 扫描角度为 $\pm 0.9909^\circ$, 发现了利用光纤激光相控阵光源在深空全光组网高速通信中具有动态角度可扫描优势。

关键词: 光纤激光器; 光纤激光相控阵; 深空通信; 扫描范围

中图分类号: TN244

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-03-0017-06

New Method of All-optical Networking Based on Optical Fiber Laser Phased-array Technology

XU Lei^{1,2}, MA Wan-zhuo^{1,3}, LI Xin²

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A new method of all-optical networking using fiber laser phased-array sources in deep space communication is proposed. The far-field relative intensity chart of 1.55 μm fiber laser phased-array sources in deep space communication is simulated. The scanning angle is controlled through adjusting the phases between array elements and the scanning angle is $\pm 0.9909^\circ$ when the wavelength, core radius, array elements number and spacing are 1.55 μm , 10 μm , 2×2 , 80 μm respectively. Simulation results show that the fiber laser phased-array sources have advantage of dynamic angle scanning in high speed communication for deep space all-optical networking.

Key words: optical fiber laser; optical fiber laser phased-array; deep space communication; scan range

空间信息网络以卫星、气球、无人机等空间平台为载体, 实时获取、传输和处理空间信息, 可服务于远洋航行、应急救援、导航定位、航空运输、航天测控等方面, 还可向下支持对地观测的高动态、宽带实时通信, 向上支持深空探测的超远程、大时延可靠传输。

全光组网在发射光功率、设备轻量化、信息高

速率等方面急需突破, 而目前采用的技术方案需要独立高精度跟瞄装置, 且发射功率不高, 为了保证信息有效传输, 限制了调制速率。当今, 空间激光通信系统采用单独的精跟踪装置, 而半导体激光器具有发射功率小、线宽较宽、调制速率低、波长稳定性差等缺点, 大大限制了其深空通信中的应用^[1]。

光纤激光相控阵技术的基础是光学相控阵技

术,可广泛应用于激光雷达、光学扫描、空间激光通信等领域^[2-5]。2008年又报道了采用了锆钛酸铅(PZT)铁电薄膜材料的一维和二维光纤非规则排列光学相控阵实验,实现了一维偏转^[6]。

然而,激光通信还有很多新的方法和技术需要探索^[9-10]。目前激光通信系统采用的1.55 μm 半导体激光器经掺铒光纤放大器后发射,但掺铒光纤放大器(EDFA)的饱和输出功率仅为5 W左右,限制了空间传输距离,而掺镱光纤放大器(YDFA)效率远高于EDFA,饱和输出功率可以更高。通信系统的灵敏度取决于光探测器灵敏度,提高光探测器灵敏度的工艺难度较大。采用1.06 μm 激光提高了发射功率,可降低光探测器灵敏度要求,简化了通信接收系统的工艺难度^[11-15]。

鉴于上述情况,提出开展基于光纤激光相控阵技术的全光组网新方法,对高速信息传输乃至空间宽带信息网络技术的研究具有现实意义并提供重要参考。模拟了1.55 μm 的光纤激光相控阵在远场的强度分布图,得出了扫描角度范围。

1 光纤激光相控阵技术的全光组网信息传出的原理结构

为了解决全光组网通信时角度扫描问题,简化通信发射系统的装置,实现光组网的动态链接。在激光相控阵实验研究的基础上,提出了一种可面向动态连接的光纤激光相控阵技术的全光组网新方法,原理结构如图1。

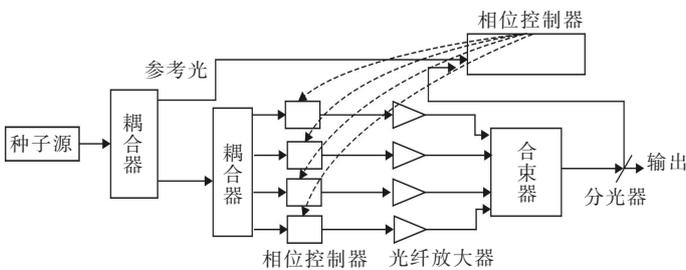


图1 光纤激光相控阵技术的全光组网原理结构图

图1中,实线信号,光纤输出的1.55 μm 单纵模激光种子源经耦合器分光,其中一束光作为参考光,在参考光分光之后进行高速信息调制,高速调制信号平均分光后进行相位控制,4路高速调制光通过合束器使同源激光相干合束,然后,分光器将一小部分(≤1%)合束激光与参考激光相位比较,再通过相

位控制电路处理发出相位控制信号,通过相位调制器控制每路光的相位,保证相干合束和发射角扫描。

该装置为光纤激光相控阵技术的全光组网新方法的传输结构。该结构简单,成本低,操作方便,可以实现光束大角度偏转,承受大功率光束,响应速度低,不具有回扫现象,适合于深空激光通信和科学研究之用。

2 光纤激光相控阵在深空传播中的模型

假设深空通信中的目标平面平行于光纤相控阵的出射平面,光学相控阵是由 $N_x \times N_y$ 个调制单元(如图2)。其相位的变化与坐标成正比,相邻的两个相控单元在 x,y 方向上的距离为 d_x 和 d_y ,每一个相控单元的半径近似等于光纤的半径 ω_0 ,假设每一个相控单元的传播方向都在同一个方向且具有相同的发射功率,则每个相控单元在出射方向上的偏转角度为 θ_{xy} ($x=1 \dots N_x, y=1 \dots N_y$)。

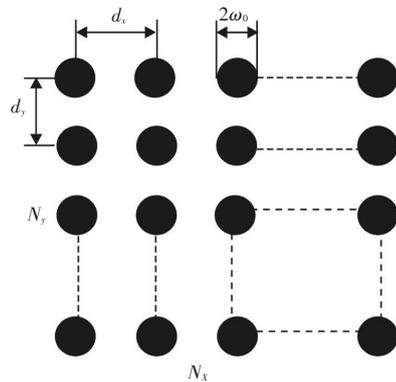


图2 光纤激光相控阵原理图

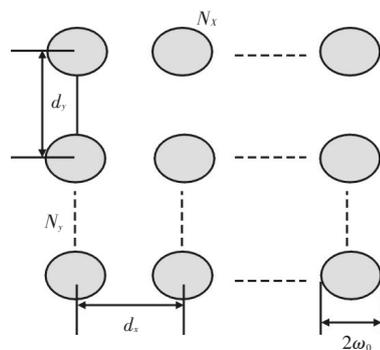


图3 二维光学相控阵

假设深空通信中的目标平面平行于光纤相控阵的出射平面,光学相控阵是由 $N_x \times N_y$ 个调制单元

(又称移相器)组成的二维阵列(如图3)。其相位的变化与坐标成正比,相邻的两个相控单元在 x, y 方向上的距离为 d_x 和 d_y ,每一个相控单元的半径近似等于光纤的半径 ω_0 ,假设每一个相控单元的传播方向都在同一个方向且具有相同的发射功率,则每个相控单元在出射方向上的偏转角为 θ_{xy} ($x = 1 \cdots N_x, y = 1 \cdots N_y$)。

当每一个相控单元有固定的相位,则在 x, y 方向上的偏转角为 ϕ_{x_0} 和 ϕ_{y_0} ,则在出射平面的相位满足下式

$$\phi_{xy} = \phi_x + \phi_y = x \frac{2\pi d_x \sin \theta_{x_0}}{\lambda} + y \frac{2\pi d_y \sin \theta_{y_0}}{\lambda} \quad (1)$$

式中, λ 是入射光的波长; θ 是设定的偏转角; d 是合束间距。

此时光纤激光相控阵的光束将偏转 θ 角度。

假设光学相控阵有 $N = N_x \times N_y$ 个相控单元,则总的光电场公式为

$$E(x, y) = C \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} \exp \left[-\frac{jk}{z} (md_x x + nd_y y) - \phi_{mn} \right] \cdot \exp \left[-\frac{k^2 \omega_0^2}{4z^2} (x^2 + y^2) \right] \quad (2)$$

其中, $C = 1/(jkz) \times \exp(jkz) \times \exp[jk(x^2 + y^2)/(2z)]$; $k = 2\pi/\lambda$ 。

则相对光强公式为

$$I(x, y) \propto |E(x, y)|^2 = \left\{ \begin{array}{l} \sin \left[\frac{\pi N_x d_x (x/z - \sin \theta_{x_0})}{\lambda} \right] \\ \sin \left[\frac{\pi d_x (x/z - \sin \theta_{x_0})}{\lambda} \right] \\ \sin \left[\frac{\pi N_y d_y (y/z - \sin \theta_{y_0})}{\lambda} \right] \\ \sin \left[\frac{\pi d_y (y/z - \sin \theta_{y_0})}{\lambda} \right] \end{array} \right\} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2 \omega_0^2}{\lambda^2 z^2} (x^2 + y^2) \right] \quad (3)$$

由于需要通过改变阵元间间距来抑制远场栅瓣,所以上述公式不适合应用于消栅瓣的研究中,将上述公式变成阵元间排列不规则的公式为

$$I(\theta) = \vec{E} \cdot \vec{E}^* \propto \left\{ \frac{\sin \left[\frac{\pi a (\sin \theta)}{\lambda} \right]}{\left[\frac{\pi a (\sin \theta)}{\lambda} \right]} \right\}^2 \cdot \left\{ \frac{\sin \left[\frac{\pi a (\sin \phi)}{\lambda} \right]}{\left[\frac{\pi a (\sin \phi)}{\lambda} \right]} \right\}^2 \cdot \left[\left(1 + \sum_{i=1}^{N-1} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} d_i \sin(\theta) \right) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N-1} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} d_i \sin(\theta) \right) \right)^2 \right]$$

$$\left[\left(1 + \sum_{i=1}^{M-1} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} D_j \sin(\phi) \right) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{M-1} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} D_j \sin(\phi) \right) \right)^2 \right] \quad (4)$$

式(4)中, N, M 分别为横坐标方向和纵坐标方向阵元的个数;其中的 d_i 为在横坐标方向上第 i 个阵元到第一个阵元间的间距; D_j 为在纵坐标方向上第 j 个阵元到第一个阵元间的间距。二维相控阵理论公式变型与一维相控阵理论公式变型相似。

3 仿真实验及结果分析

3.1 用于深空通信中的光纤激光相控阵分析

文中模拟 $1.55 \mu\text{m}$ 的激光光源的光纤激光相控阵在深空通信中远场的强度,其中设置的参数为:激光波长 $1.55 \mu\text{m}$;相邻相控单元的距离 $d_x = 30 \mu\text{m}$, $d_y = 30 \mu\text{m}$;纤芯的半径 $\omega_0 = 10 \mu\text{m}$;深空通信的距离 $z = 50 \text{km}$;相控单元的数目 $N_x = 2, N_y = 2$; y 方向上的偏转角 $\theta_{y_0} = 0^\circ$ (如图4)。

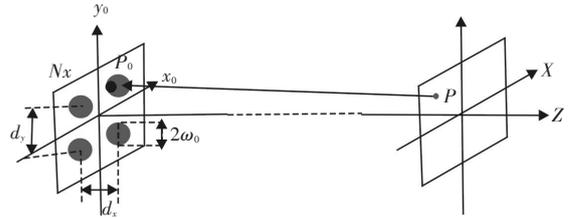


图4 相控单元数目在Y方向上的偏转角度

通过控制各个相控单元之间的相位变化,得到在远场的光强图如图5。

通过调节相位控制器中激光束的相位来控制光束的波前,实现光束偏转。当偏转角为 0° 时,远场光强为最大值,增大偏转角,远场光强的极大值开始变小,次极大开始变大,当偏转角达到 3.8° 时,出现两个相等光强的峰值,此时无法正确、清晰地观察物体位置。当继续增大偏转角时,会出现误差,此时,对于空间激光通信,将会增加误码率,使信息传输出现错误。在实际空间光通信中,次极大的值为最大光强值的一半或者更小的时候都能很好的进行信息传输,下面通过模拟一维4个阵元的光纤激光相控阵在深空通信中的扫描角度。则光强公式如下

$$I(x) = \tilde{E} \cdot \tilde{E}^* \propto \left\{ \frac{\sin \left[\frac{\pi N_x d_x (x/z - \sin \theta_{x0})}{\lambda} \right]}{\sin \left[\frac{\pi d_x (x/z - \sin \theta_{x0})}{\lambda} \right]} \right\}^2 \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2 \omega_0^2}{\lambda^2 z^2} (x^2) \right] \quad (5)$$

其中, $N_x = 4$; $d_x = 30 \mu m$; $\omega_0 = 10 \mu m$; $z = 50 km$; $\lambda = 1.55 \mu m$ 。

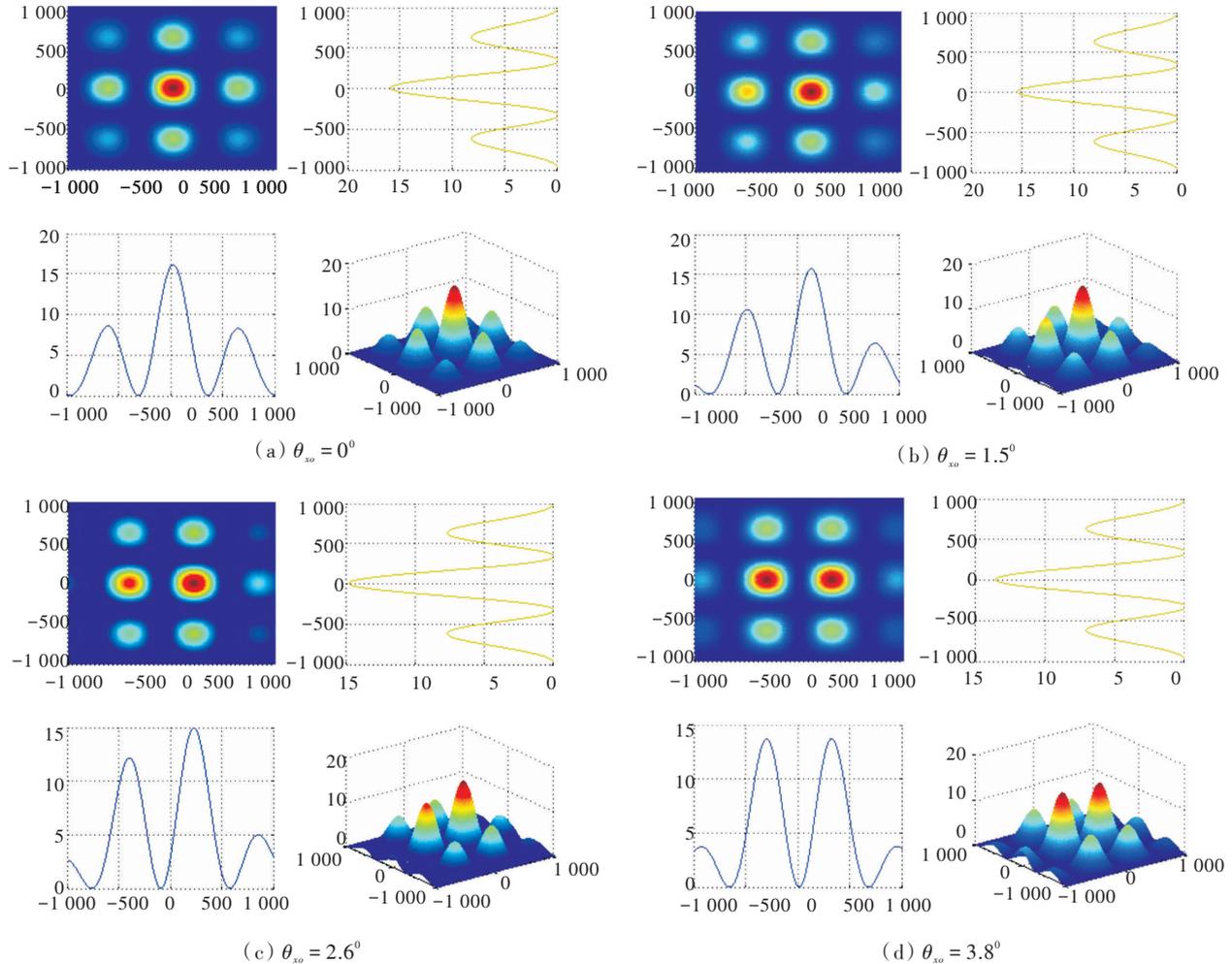


图5 相控阵远场切向强度分布

图6为扫描角度图。图6a为扫描角度为 0° 时的次极大为主极大强度的0.1224倍,图6b为扫描角度为 0.5026° 时的次极大为主极大 $1/4$ 倍,图6c为扫描角度为 0.7053° 时的次极大为主极大 $1/3$ 倍,图6d为扫描角度为 0.9909° 时的次极大为主极大 $1/2$ 倍。图6d的扫描角度就是实际通信中的最大角度,在 $\pm 0.9909^\circ$ 可以进行良好的通信,利用多个这样的光纤激光相控阵在这个角度范围之内可以组成自己的全光组网。

由复振幅公式(2)可知,复振幅的强度和阵元

的数目成正比,所以通过增加阵元的数目可以增加输出光强,由光强表达式(3)可知,光强最大值和次极大值之间的对比度也与阵元的数目成正比,所以可以通过增加阵元的数目降低通信传输中的误码率,提高信息的传输速率。

由相位差公式(1)可知,当相位差不变时,光纤激光相控阵的偏转角度和阵元间距成正比,与波长成反比。所以当增加阵元间距时或减小波长时,可以提高光纤激光相控阵的偏转角度。

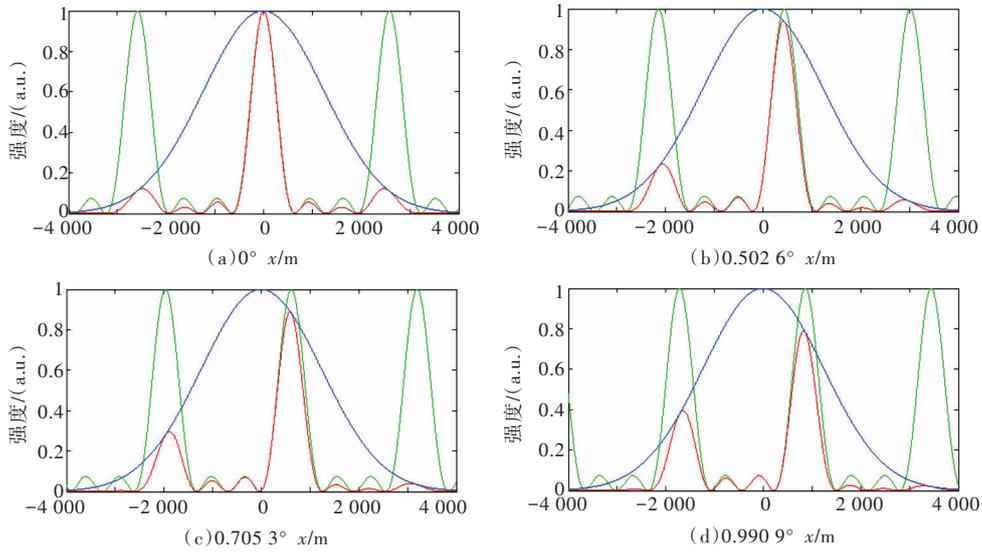


图6 扫描角度图

通过以上分析总结可以看出,增加阵元数目可以增加扫描精度,同时可以增加光纤激光相控阵的发射功率。下面对阵元数目为 10×10 , 距离为 $z = 50 \text{ km}$, 波长分别为 $1.55 \mu\text{m}$ 、 $1.064 \mu\text{m}$ 和 $1.31 \mu\text{m}$ 时,通过改变阵元间距,当获得两个相等远场强度分布图时,偏转角度如表1所示。

表1 阵元间距不同时的偏转角度

阵元间距/ μm	偏转角度/ $^\circ$		
	$1.55 \mu\text{m}$	$1.064 \mu\text{m}$	$1.31 \mu\text{m}$
50	0.874 4	0.600 2	0.739 1
60	0.724 6	0.497 4	0.612 4
70	0.616 9	0.423 5	0.521 4
80	0.535 8	0.367 6	0.452 6
90	0.471 8	0.323 9	0.398 9
100	0.420 3	0.288 4	0.355 0
110	0.377 8	0.259 4	0.319 3
120	0.342 1	0.234 9	0.289 3

表1为在阵元间距不同的情况下,在远场出现两个相等的光强分布时的最大的偏转角度,在此偏转角度的情况下,无法清晰地分辨物体。但是,也不能将此角度定义为光纤激光相控阵的偏转角度。因为,在远场中主瓣的旁边有许多栅瓣和副瓣^[7],栅瓣的能量和主瓣的能量相近,此时将影响光纤激光相控阵的精度,由式(6)可以得到产生最大光强的位置。

$$N \frac{\pi d(\sin \theta_x - \sin \theta_{x_0})}{\lambda} = 0 + 2m\pi \quad (6)$$

当式(6)的值为0时,得到的是主瓣位置,当式(6)的值为 $2m\pi$ 时,得到的是栅瓣位置。当 $\theta_x = 90^\circ$ 或 -90° , 上式简化为

$$d(1 + |\sin \theta_{x_0}|) = \lambda \quad (7)$$

由式(7)可知,当满足 $d < \lambda$ 时,光纤相控阵中没有栅瓣。但是由于光波的波长极短,满足这样的条件非常困难,所以定义栅瓣强度的最大值与主瓣强度的比值等于0.5时,此时的偏转角度为光纤激光相控阵的最大的偏转角度^[8]。表2为阵元数目 20×20 的不同波长的光纤激光相控阵在不同距离的最大偏转角度。

表2 阵元数目 20×20 的不同波长的光纤激光相控阵在不同距离的最大偏转角度

阵元间距/ μm	偏转角度/ $^\circ$		
	$1.064 \mu\text{m}$	$1.55 \mu\text{m}$	$1.31 \mu\text{m}$
20	1.416 9	1.950 1	1.723 9
25	1.204 6	1.616 3	1.404 7
30	1.064 1	1.401 1	1.237 3

通过表2发现,当增大阵元间距时,偏转角度下降。在阵元间距相等的情况下, $1.550 \mu\text{m}$ 的光纤激光相控阵的偏转角度比 $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.064 \mu\text{m}$ 的光纤激光相控阵的偏转角度大,在深空通信中, $1.55 \mu\text{m}$

的光纤激光相控阵的偏转角度已经可以更好的满足深空通信的使用要求,且对探测接收器件的灵敏度要求较低。所以,在深空通信中,1.55 μm 的光纤激光相控阵技术在深空通信中具有较好的应用前景。

4 结 论

探讨了光纤激光相控阵在深空通信中的应用。通过模拟光纤激光相控阵在远场的强度分布图,得知在深空通信中以1.55 μm 光源的光纤激光相控阵更适用于全光组网中。因此,1.55 μm 的光纤激光相控阵技术应用于深空高速传输,省略了机械式精跟踪激光扫描系统,传输距离远、精度高,对研究深空高速信息传输具有重要意义。

参考文献

- [1] 罗建将,李洪祚,唐雁峰,等.深空探测激光通信技术发展研究[J].航天器工程,2013,22(2):94-97.
 - [2] Polishuk A, Arnon S. Communication performance analysis of microsatellites using an optical phased array antenna[J]. Opt. Engng. 2003, 42(7):2015-2024.
 - [3] Mcmanamon P F, Porscher T A. Optical phased array technology.
 - [4] IEEE. 1996, 84(2): 268-298.
 - [5] Leeb W R, Neubert W M, Kudielka K H, et al. Optical phased array antennas for free space laser communications [c]. SPIE, 1994, 2210:14-29.
 - [6] Zhao Y, Yang X, Cai Q, et al. Application of simulated annealing to design and realisation of two-dimension fiber-type optical phased array[J]. Electron. Lett., 2008, 44:490-492.
 - [7] Yin, Kim J H, Wu F, et al. Ultra-fast speed, low grating lobe optical beam scanning using unequally spaced phased array technique[J]. Opt. Comm, 2007, 270:41-46.
 - [8] ZHAO Si-si, YE Zheng-yu, YANG Deng-cai, et al. Far field analysis of fiber laser phased array for free space communication[J]. IEEE Photonics and Optoelectronics 2011 Symposium on, 978-1-4244-6554-5/11.
 - [9] 刘宏展,孙建锋,刘立人.空间激光通信技术发展趋势分析[J].无线光通信,2010,8:39-42.
 - [10] 夏贵进,占生宝,谢小平,等.空间激光通信技术及其发展[J].军事通信技术,2012,23(2):65-69.
 - [11] KATE J. Phase-Locking of Semiconductor Injection lasers, the Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42-46[C]. Pasadena, California, 1981: 101-104.
 - [12] KATE J. High Power Semiconductor Lasers for Deep Space Communications, the Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42-63[C]. Pasadena, California, 1981: 40-50.
 - [13] KATE J. Power Efficiency of Semiconductor Injection Lasers, the Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42-46[C]. Pasadena, California, 1981: 94-100.
 - [14] DAHER J. Preliminary Results Toward Injection Locking of an Incoherent Laser Array, The telecommunication and Data Acquisition Progress Report 42- 84[C]. Pasadena, California, 1986: 26-34.
 - [15] HEMMAT H. Single Longitudinal Mode Operation of Semiconductor Laser Arrays With Etalon Control, the Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42-86 [C]. Pasadena, California, 1986: 66-69.
-
- (上接第4页)
- [6] 刘海波,谭吉春,沈本剑,等.像差对星跟踪器星点定位精度的影响[J].光学技术,2009,35(3):471-473.
 - [7] Singla P. A new attitude determination approach using split field of view star camera[M]. Texas A&M University, 2002.
 - [8] 刘海波,杨建坤,谭吉春,等.一种星跟踪器恒星像点位置提取方法[J].光学技术,2001,24(2):15-20.
 - [9] 吴峰,沈为民.折反式大视场星跟踪器光学系统设计[J].光学技术,2004,30(2):142-145.
 - [10] 董瑛,邢飞,尤政.基于CMOS APS的星跟踪器光学系统参数确定[J].宇航学报,2004,25(6):25-27.
 - [11] Juergens R C, Coronato P A. Improved method for transfer of FEA results to optical codes[J]. 2003, 12(3):12-15.
 - [12] 谈恒英,郁道银.工程光学[M]. 2版.北京:机械工业出版社,2006.
 - [13] 刘海波,谭吉春,沈本剑,等.像差对星跟踪器星点定位精度的影响[J].光学技术,2009,35(3):471-473.
 - [14] 张登臣,郁道银.实用光学设计方法与现代光学系统[M].北京:机械工业出版社,1995.
 - [15] 袁旭沧.光学设计[M].北京:科学出版社,1983.