

·测试、试验与仿真·

光纤激光相控阵技术的通信研究

韩建^{1,3}, 陈恒², 马万卓^{1,2}, 孙鸿伟^{1,2}, 柳涛², 谷俊达², 徐磊^{1,2}

(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. 长春理工大学光电工程学院, 长春 130022; 3. 上海微电子装备有限公司, 上海 201203)

摘要:提出了利用光纤激光相控阵技术组建全光组网的新方法。且远场栅瓣的存在不仅缩小了光束的扫描范围, 还分走了大量主瓣的能量, 缩短了通信距离。文中还提出了通过改变阵元间的间距来达到消除栅瓣的目的, 完成了相应的仿真工作, 并通过实验验证了利用相控阵技术进行通信的可行性。

关键词: 光纤; 相控阵; 栅瓣; 阵元间距

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-02-0074-04

Research on Communication Based on Optical Fiber Laser Phased Array Technology

HAN Jian^{1,3}, CHEN Heng², MA Wan-zhuo^{1,2}, SUN Hong-wei^{1,2}, LIU Tao², GU Jun-da², XU Lei^{1,2}

(1. Space Photo-electronic Technology National & Local Joint Engineering Research Center, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Institute of Photo-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 3. Shanghai Micro Electronics Equipment Co. Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: A new method using optical fiber laser phased array technology to build all-optical networking is proposed. The beam scanning range is narrowed, much energy of main lobe is distributed and the distance of communication is shortened for the existing of far-field grating lobes. The purpose of eliminating the grating lobe can be achieved through changing the space between elements. And the corresponding simulation works are completed. The feasibility of performing communication using phased array technology is verified by experiments.

Key words: optical fiber; phased array; grating lobe; array element spacing

近年来,自由空间激光通信技术日益成熟,其具有发射光束窄、增益高、传输带宽大、安全性好、质量轻、功耗低、体积小等特点,适合空间大容量信息传输。各国已成功开展星间、星地高速信息传输激光链路演示验证。未来激光通信技术将大规模应用在民用、地球与空间科学等各个领域。然而,激光通信还有很多新的方法和技术需要探索^[1-7]。

利用光纤激光相控阵做发射源的空间激光通信技术,使用光纤激光相控阵发射源作为通信光源,优点大致可以分为三类:(1)采用阵列结构可以

增加输出光的能量,为将来超远距离通信提供有力保证。(2)利用相控阵进行角度扫描具有精度高的特性,可以准确进行通信,同时增加了通信的速率。(3)利用相控阵技术进行角度扫描时具有扫描速度快的优点,理论上比传统机械扫描效率高很多。光纤激光相控阵技术是目前新兴的光纤激光相干合成技术,不仅可实现高发射功率,还能对发射光束扫描,可用于激光通信与跟踪功能共用,并实现全光空间通信网络动态连接。因此,光纤激光相控阵技术可应用于空间高速信息传输,对研究全

收稿日期: 2015-03-09

作者简介: 韩建(1989-),男,硕士研究生,主要从事光纤通信方面的研究;陈恒(1988-),男,硕士研究生,主要从事光学薄膜方面的研究。

光网络高速激光通信技术具有重要意义^[8-11]。

1 光纤激光相控阵角度扫描结构

光纤激光器相控阵阵列结构复杂。图1是适用于角度扫描的光纤激光器相控阵阵列结构。图1中,实线表示光信号;虚线表示电信号。光纤输出的激光种子源经耦合器分光,其中一束光作为参考光,其余部分作为相控阵光束,其通过相位调制器后经高功率光纤放大器放大,再通过合束器使同源激光相干合束。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。

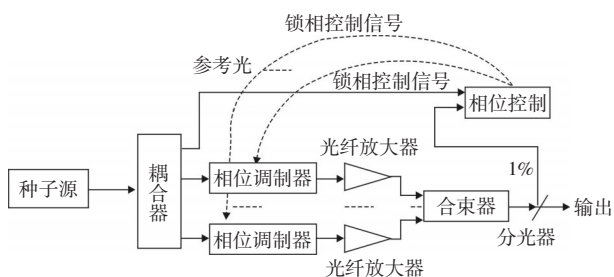


图1 光纤激光相控阵角度扫描结构

2 光纤激光相控阵高速信息传输结构

光纤激光相控阵高速信息传输结构如图2所示。其中光纤输出的激光种子源经耦合器分光,其中一束光作为参考光,其余部分作为高速信息传输光,其经过强度调制器加载传输信号,再经过相位调制器后经高功率光纤放大器放大,再通过合束器使同源激光相干合束。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。

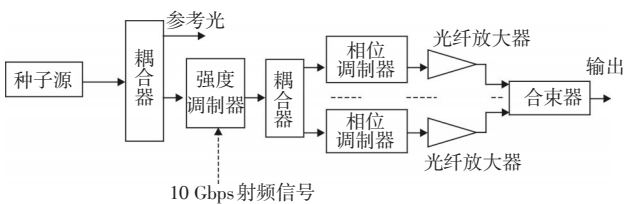


图2 光纤激光相控阵高速信息传输原理结构

3 一维光纤激光相控阵原理

一维相控阵阵元远场光强度公式和不规则排列的远场光强公式的区别,通过改变阵元间间距可以实现远场的栅瓣消除。本小节主要通过 Matlab 仿真改变阵元间距离实现一维光纤激光相控阵远场栅瓣消除的。由于阵元的大小影响着衍射,不考虑阵元大小就是不考虑衍射的影响,下面是栅瓣抑制理论公式

$$E(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{\pi a(\sin\theta)}{\lambda}\right]}{\left[\frac{\pi a(\sin\theta)}{\lambda}\right]} \times \sum_{i=0}^{N-1} e^{j(2\pi d_i \sin(\theta)/\lambda - 2\pi d_i \sin(\theta_p)/\lambda)} \quad (1)$$

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

其中,式(2)中的 $d_2=10 \mu\text{m}$,为第2个阵元到第一个阵元间的间距;式(2)是在第2节所推导出来的公式,它是式(1)的变形。先从式(1)与式(2)远场光强图出发,对比远场光强度(如图3所示)。

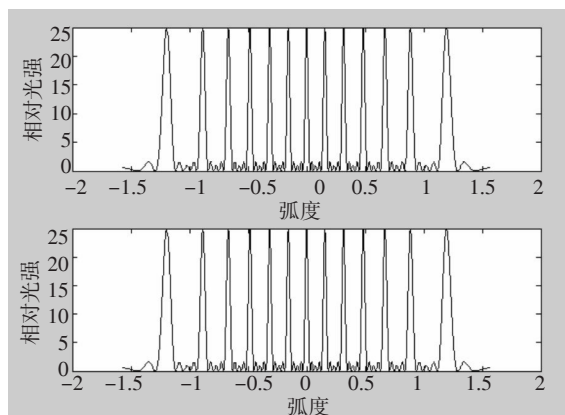


图3 远场光强对比图

只有改变阵元间的间距才能消除远场波束中的栅瓣。从式(1)中无法找出有效的方法可以随意的改变阵元间的间距,但是式(2)很清晰地给出了

每一个阵元到第一个阵元间的间距 d_i , 通过改变 d_i , 可以找到消除远场中波束的栅瓣的方法。例如可使阵元间的间距变为 $(d, 1.75d, 3.125d, 4.4d)$, 即通过改变阵元间距改变远场光强, 其效果如图4所示。

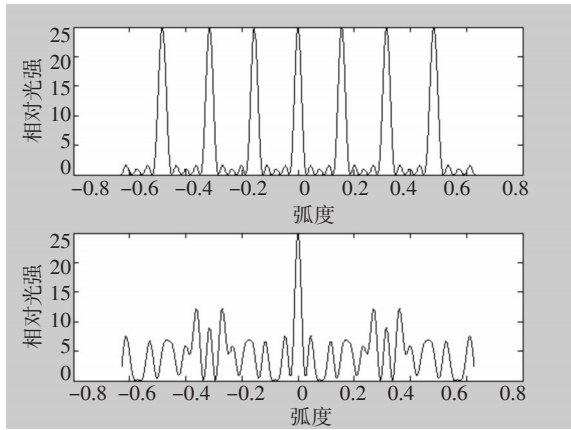


图4 改变阵元间距时远场光强图

为了增加分辨率, 把扫描角度取 $(-35^\circ \sim +35^\circ)$ 。此时消除栅瓣的条件为每个阵元到第一个阵元的间距为 $(d, 2.75d, 3.5d, 4d)$ 。

下面模拟在通信试验中一维光纤激光相控阵的远场光强。在试验中选取功率最大可调 10 W 的 $1.064\ \mu\text{m}$ 的激光光源, 采用 1×4 耦合器将种子源进行分光, 合束器采用与光纤包层等宽度 ($127\ \mu\text{m}$) 的 V 型槽结构进行合束, 光纤纤芯直径为 $10\ \mu\text{m}$, 首先通过比较宽的范围寻找衍射主极大的大致范围。

图5上部分为远场光强图。可以看出, 主极大在 $(-0.08\ \text{rad} \sim +0.08\ \text{rad})$; 下部分为不考虑衍射时的远场干涉图。从中可以看出, 栅瓣之间的弧度相差很小, 给远场消栅瓣带来困难。

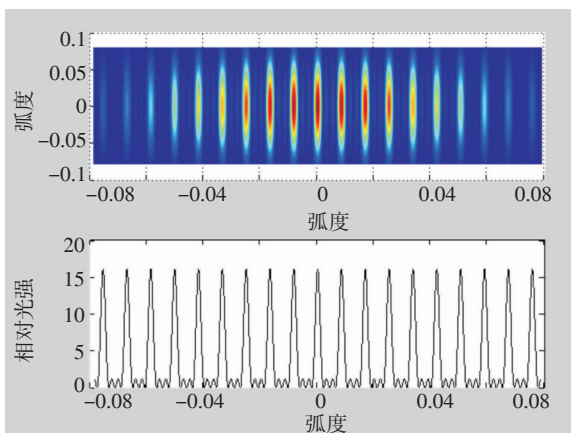


图5 远场栅瓣图

通过仿真改变合束器的 V 型槽结构的距离进行远场消栅瓣。条件为阵元间间距分别为第一阵元为 $d, 1.18d, 1.5d$ 的远场光强度。图6为改变阵元间间距的远场光强度图。

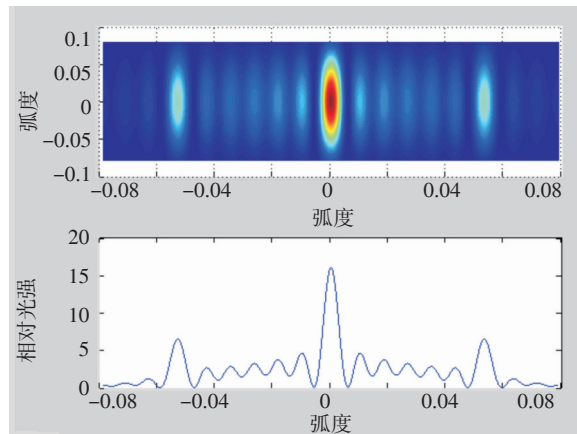


图6 改变阵元间距的远场强度图

4 利用一维相控阵进行通信实验

实验用到的是 1×4 的一维光纤相控阵阵列, 原理为如图7所示。其中的实验器材: 1 为种子源 (根据光电转换器选择种子源); 2 为耦合器 (实验使用耦合透镜); 3 为强度调制器; 4 为信号发生器; 5 为 1×4 耦合器; 6 为 V 型槽控制间距的光纤阵列; 7 为显微镜; 8 为光电转换器; 9 为误码率分析仪。

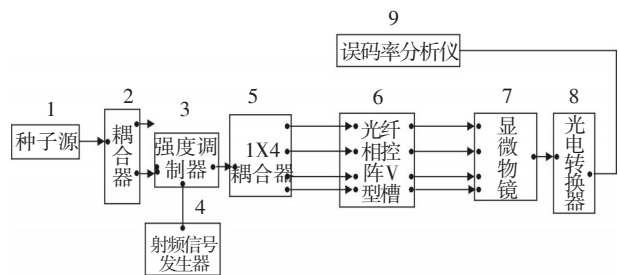


图7 通信实验原理图

实验实物连接图如图8所示。通信器材如图9所示。连接方式为: 激光种子源1的输出端与耦合器2的输入端相连, 耦合器2的一个输出端与强度调制器3的输入端相连, 信号发生器4的输出端与强度调制器3的控制端相连, 强度调制器的输出端与 1×4 耦合器5的输入端相连, 1×4 耦合器的输出端经 V 型槽控制光纤阵列的间距, 光纤阵列中的光经一定距离的自由空间传输形成干涉, 相干光经过光

电转换器8将光信号转换成电信号到误码率分析仪9。

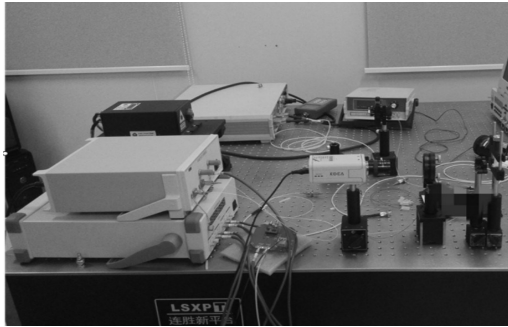
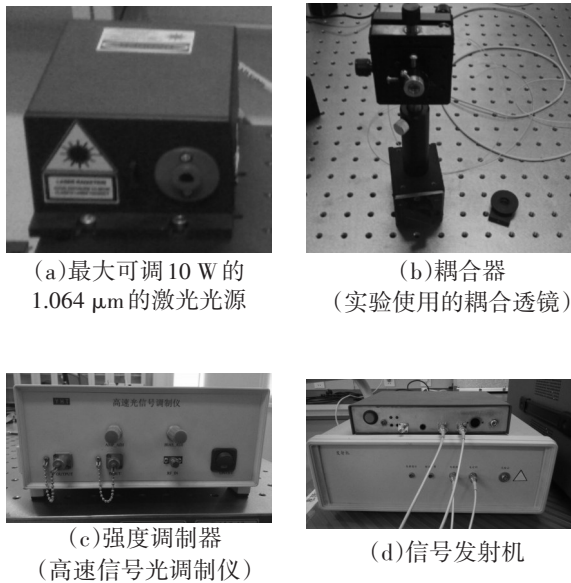


图8 通信实验实物连接图



(a)最大可调10 W的1.064 μm的激光光源

(b)耦合器 (实验使用的耦合透镜)

(c)强度调制器 (高速信号光调制仪)

(d)信号发射机

图9 通信器材

记录误码率分析仪的数据为误码率在 10^{-6} 量级。

去掉耦合器5的3个输出端,只保留一个输出端,记录误码率分析仪在30 min内的数据为误码率在 10^{-6} 量级。

通过调节信号发生器的通信速率,记录误码率分析仪在30 min内的数据为误码率在 10^{-5} 量级。

通过在自由空间增加光的衰减,记录误码率分析仪在30 min内数据为误码率在 10^{-6} 量级。

实验中所用的误码率测试仪可以测量光纤激光相控阵发射源的误码率,表1给出了在10 min内记录的5组误码率的测试结果。

表1 光纤激光相控阵发射源的误码率

时间/min	误码率
2	10^{-6}
4	10^{-8}
6	10^{-8}
8	10^{-8}
10	10^{-7}

由表1可以看出,误码率在10 min内有一定变化,最大为 10^{-6} ,最小为 10^{-8} ,满足空间激光通信要求。

5 结论

文中所做的实验为光纤激光相控阵发射源的初步试验。从观察的3 h时间内选取了误码率变化最小、最低的情况下,记录了一组数据。由于激光器的偏振状态,耦合进入光纤的情况很容易随着外在条件的变化而变化,所以误码率变化较大且不易保持稳定,所以需时常调节误码率测试仪上的按钮,并且光纤激光相控阵上没有加入相位控制器、光纤放大器等一些设备,因此实验只是简单地论证了光纤激光相控阵在空间激光通信中的应用,为后续的激光通信以及全光组网奠定了初步的实验基础以及理论基础。

参考文献

- [1] 吕春雷,佟首峰,姜会林,等. 激光通信的研究现状及关键技术[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2012, 35(1): 1-5.
- [2] 贾潞华,雷建设. 空间激光通信系统组成及其发展[J]. 光电子技术与信息, 2001, 14(2): 29-34.
- [3] 佟首峰,姜会林,张立中. 高速率空间激光通信系统及其应用[J]. 红外与激光工程, 2010(4): 649-654.
- [4] 李睿,赵洪利,曾德贤. 空间激光通信及其关键技术[J]. 应用光学, 2006, 27(2): 152-154.
- [5] 聂文强,曾小东. 空间激光通信技术[J]. 电子科技, 1998(2): 3-12.
- [6] 刘宏展,孙建锋,刘立人. 空间激光通信技术发展趋势分析[J]. 光通信技术, 2010, 34(8): 39-42.
- [7] 胡渝,刘华. 空间激光通信技术及其发展[J]. 电子科技大学学报, 1998, 27(5): 453-461.

(下转第82页)

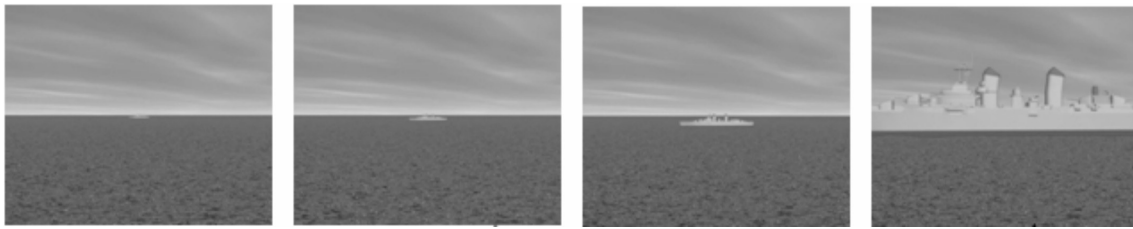


图6 导弹由远及近跟踪舰船目标的变化情况

4 结束语

以 Visual C++ 为开发平台, 建立海洋环境三维场景, 在 OpenGL 下调用 3D MAX 建立的舰船模型, 采用纹理映射、场景的合成渲染、双缓存等技术, 初步实现了反舰导弹靶场试验目标/背景图像的生成, 下一步的目标是使整个系统的仿真程度和目标/背景更加复杂、逼真。

虚拟海洋场景的复杂度可以加入雨、雪、雾、海岛等环境因素; 实体模型的构建上应针对不同的舰船目标建模、加载; 舰船目标在导引头视场中的位置和姿态; 舰船的海上航行和规避等战术动作也需考虑。这样很大程度上提高了系统仿真的逼真度和目标信息库的可信度, 有利于靶场进行反舰导弹可见光导引头的识别与跟踪能力的性能验证。

参考文献

- [1] 单伟, 郭恒业. 2100CIG 计算机图像生成系统[J]. 战术导弹技术, 1994(3):50.
 - [2] 虞红, 雷杰. 可见光成像制导半实物仿真中的图像生成技术[J]. 现代防御技术, 2006, 34(6):107-113.
 - [3] 向哲, 李善高. 反舰导弹靶场试验视景仿真技术[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(2):235.
 - [4] (美) Shreiner D. OpenGL 编程指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008:228-278.
 - [5] 郭兆荣, 李蓄, 王彦. Visual C++ OpenGL 应用程序开发[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
 - [6] 李一华. 基于 OpenGL 的虚拟场景生成技术[J]. 舰船电子工程, 2010(4):137.
 - [7] 王相海, 李婷婷. 基于几何建模的海浪模拟[J]. 计算机科学, 2011, 38(10):259-261.
 - [8] 扬怀平, 孙家广. 基于海浪谱的波浪模拟[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(9):1175-1178.
 - [9] Lindstrom P, Koller D, Ribarsky W, et al. Real-time, continuous level of detail rendering of height fields[C]//Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, New Orleans, Louisiana, 1996:109-118.
 - [10] 尹宝瑞. 基于 OpenGL 虚拟海洋环境仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010:47-62.
 - [11] 刘琪. 基于 OpenGL 的三维景观动态仿真[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(7):32-37.
 - [12] 王清辉, 李静荣. CAD 应用程序开发详解—Visual C++ 与 OpenGL 综合应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
 - [13] 焦淑红, 朱婧, 王利国. 基于 3D MAX 的船舶运动仿真[J]. 应用科技, 2006, 33(3):35-37.
 - [14] 任群. VC++ 与 OpenGL 混合编程实现三维图形处理[J]. 大众科技, 2010(1):38-40.
-
- (上接第77页)
- [8] Wang X, Wang B, McManamon P F, et al. Spatial resolution limitation of liquid crystal spatial light modulator[J]. SPIE, 2006, 5553: 46-57.
 - [9] Nakamura K. Optical beam scanner using kerr effect and space-charge-controlled electrical conduction in KTa_{1-x}Nb_xO₃ crystal[J]. NTT Technical Review, 2007, 5(9): 1-8.
 - [10] Engström David, Michael J O'Callaghan, Walker Chris, et al. Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array[J]. Appl. Opt., 2009, 48(9): 1721-1726.
 - [11] Fermann Martin. High power parallel fiber arrays[J]. US Patent Application Publication, US 2014/0036350 A1, 2014-2-6.