

## 液晶光学相控技术在卫星通信多接入中的应用

张天一<sup>1</sup>, 汪相如<sup>2</sup>, 黄子强<sup>1</sup>, 吴亮<sup>3</sup>, 许剑华<sup>1</sup>, 谭庆贵<sup>4</sup>

- (1. 电子科技大学 电子科学技术研究院, 四川 成都 610054;
2. 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054;
3. 电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054;
4. 空间电子信息技术研究院 中国空间技术研究院, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 在空间激光通信、组网过程中, 为了能够实现一颗卫星终端对多颗卫星终端的物理光束接入, 从而使得一颗卫星能与多颗卫星实现数据分发、路由、交换等组网功能, 对卫星激光通信捕跟过程中存在的多终端物理接入方法进行了研究。在基于液晶光学相控阵多波束生成能力和多波束赋形的理论基础上, 设计了一种新型的多终端接入方法。该方法的核心是利用液晶光学相控阵的多波束生成与控制能力实现对多个终端的接入。对光束在远场光斑的位置信息以及接入过程中的衍射效率和能量损耗情况进行仿真来验证该方案是否满足空间激光通信终端接入要求。仿真结果发现接入过程中的衍射效率大于 80%, 能量损耗小于 1 dB, 表明该方案有效可行。

**关键词:** 激光通信; 多波束; 捕跟; 液晶光学相控阵

**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1122004

## Application of liquid crystal optical phasing technique in multi – access of satellite communication

Zhang Tianyi<sup>1</sup>, Wang Xiangru<sup>2</sup>, Huang Ziqiang<sup>1</sup>, Wu Liang<sup>3</sup>, Xu Jianhua<sup>1</sup>, Tan Qinggui<sup>4</sup>

- (1. Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;
2. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China
3. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China
4. Academy of Space Information System, China Academy of Space Technology, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** In the process of space laser communication and networking, in order to achieve a satellite terminal for the physical beam access to a plurality of satellite terminals, thereby enabling a satellite to achieve data distribution, routing, switching and other networking functions with multiple satellites, the multi-user physical access method in the process of satellite laser communication acquisition and tracking was studied. Based on the theory of multi-beam forming ability and multi-beam forming of liquid crystal optical phased array, a new type of multi-user access method was designed. The core of this method was to realize the access to multiple terminals by using multi-beam generation and control ability of liquid crystal optical phased array. The position information of the beam in the far field and the diffraction

收稿日期: 2017-03-11; 修订日期: 2017-04-21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61405029); 国家自然科学基金重大研究计划(91438108); 上海航天 SAST 基金(SAST2015087)

作者简介: 张天一(1992-), 男, 硕士生, 主要从事液晶相控阵、空间激光通信方面的研究。Email: zty920721@163.com

导师简介: 黄子强(1956-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事液晶及光电子方面的研究。Email: zqhuan@188.com

efficiency and energy loss during the process were simulated to verify whether the scheme met the requirements of the space laser communication terminal. The simulation results show that the diffraction efficiency of the access process is greater than 80%, energy loss less than 1 dB, the results display that the proposed method is effective and feasible.

**Key words:** laser communication; multi-beam; acquisition and tracking;  
liquid crystal optical phased array

## 0 引言

空间激光通信具有通信容量大、传输速率高、抗干扰能力强、系统结构简单、体积小、质量轻等优点,是当前星地、星间通信的研究热点之一<sup>[1-3]</sup>。同时,当前激光通信捕跟系统具有接入时间长、光束指向唯一的特点,只适合点对点激光链路通信,无法进行多终端之间快速接入、组网,因此很难支持未来空间信息网的高效组网需求。究其本质在于:当前激光通信捕跟系统的核心是光学透镜和机械转台相结合的机械式光束控制技术。机械连续扫描和单光束控制是该种技术体制的重要特点。

对于空间激光组网的物理接入层来说,一点对多点、多终端灵活接入是其重要物理层需求<sup>[4]</sup>。光学相控技术是一种新型的光束控制技术<sup>[5]</sup>,能够从光束重新赋形的角度,从机理上突破传统技术不足,实现多光束指向的捷变控制。Jay Stockley 以及 Steven Serati 等人<sup>[6-7]</sup>提出基于 PAPA(Phased Array of Phased Arrays)技术,实现对子孔径的动态配置,增加光束控制系统对终端入射光束控制的灵活性,并且将该技术用于多片 OPA 组成的结构中,实现对多个接入光束的准确定位。Anhong Dang<sup>[8]</sup>提出 SCDMA 技术处理多波束接入问题,对于每一路信号用 PN 码对其调制。为了同时捕获和跟踪多路信号,他提出了基于信号子空间的盲算法,该算法利用接收信号的协方差矩阵来对多路信进行选择 and 定位。这些解决方案存在着系统整体结构复杂,不够高效,关注点在于后续接入信号的处理上等问题,未能得到广泛应用。

液晶光学相控阵(LC-OPA)具有波束赋形、多波束生成、光束快速捷变等能力。液晶光学相控阵的相控波束赋形能力能够对激光光束进行精确的捷变指向控制<sup>[9-10]</sup>;其多波束形成能力可以实现对多个角度

进行同时光束指向;其光束捷变能力可以满足多用户的动态快速切换。同时,相控阵的无机械扫描结构更加有助于降低系统总体的尺寸、重量、功耗和系统复杂度,高集成度特性使得其功耗低,封装紧凑,尺寸小,适用于空间激光通信的需求。

文中基于液晶光学相控阵的多波束形成技术<sup>[11-12]</sup>,针对空间激光通信捕跟过程中的多点接入问题,提出一种新型的多终端接入模型。该模型重点在于解决在低功率损耗的情况下精确接入多个光束的问题;在该模型中,只需采用两块液晶光学相控阵,并且对它们分别进行区域划分处理;通过对不同区域的光束指向控制来实现对于多个接入光束的精确定位,该模型为空间激光通信组网的研究提供新方向。

## 1 多终端接入系统模型和原理

### 1.1 系统组成

当多个来自不同终端卫星的激光光束入射到本地终端时,将这些终端卫星称之为待接入终端。为了能够清晰说明系统工作原理,后文将只以两个待接入终端  $A_1$ 、 $A_2$  举例说明,而本地通信终端用  $B$  表示,它能够同时接入多个终端,如图 1 所示。

图 1 是基于液晶光学相控阵的多终端接入系统组成框图。该系统包含相控阵天线子系统、捕跟子系统、精跟踪子系统。其中每个子系统都划分成两个支路:主支路和副支路,分别完成系统光路的接入控制和待接入终端到达角信息的获取功能。

主支路由主液晶光学相控阵、消偏振分光棱镜(N-PBS)、透镜、CCD 组成;副支路包括副液晶光学相控阵、透镜、CCD。在主支路中,分光棱镜将经过 LC-OPA 后的激光光束分成两路,一路经过透镜汇聚到主 CCD,另一路进入精跟踪模块进行后续角度校正;副支路的功能是处理新接入的终端光束,只经过透镜、副 CCD 一路光路。

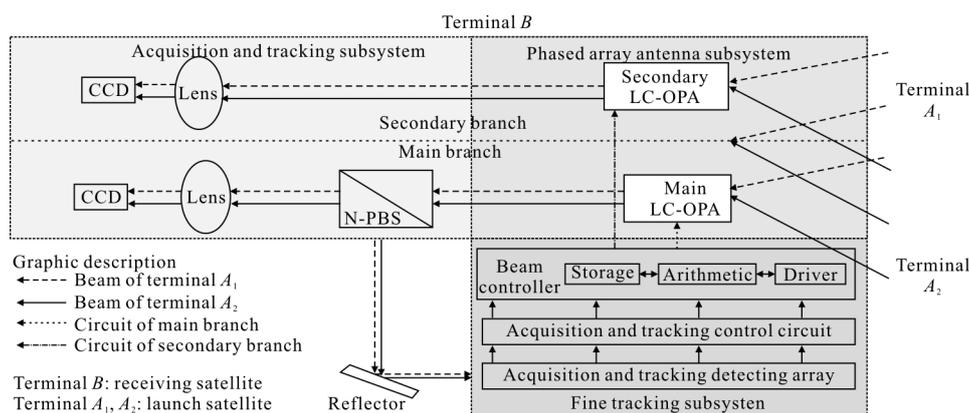


图 1 多终端接入系统组成框图

Fig.1 Block diagram of multi-terminal access system

在捕跟控制子系统中,主、副支路之间采用总线方式进行数据传输和交互;将经过 CCD 所获取的信号传输到后台计算机进行处理<sup>[13]</sup>;控制计算机以控制伺服系统驱动光学天线,使得光学天线对准终端入射光方向,然后再根据精跟踪模块中角度的校正进行精确定位。

### 1.2 液晶光学相控阵多波束理论

液晶光学相控阵的相控方法主要有周期性闪耀光栅法、非周期闪耀光栅法等。基于非周期闪耀光栅的液晶相控阵的相控思想为:通过控制相邻电极之间的相位差来达到角度偏转的目的。它的偏转角度可以写为:

$$\sin\theta = \frac{\Delta\phi}{k_0 \cdot d} \quad (1)$$

式中: $k_0$ 为入射光的波矢量, $k_0 = 2\pi/\lambda$ , $\lambda$ 是光束的波长; $\Delta\phi$ 为相邻相控单元间的相位延迟差; $d$ 为相邻电极的间距; $\theta$ 为经过液晶相控阵后光束的偏转角度。

对于非周期闪耀光栅模型下的液晶光学相控阵,其相位调制是理想的阶梯函数。可写为:

$$\phi(x) = \left[ \sum_{i=1}^N \delta(x-id) \exp(j \cdot \text{rem}(i \cdot \Delta\phi, 2\pi)) \right] \otimes \text{rect}(x/d) \quad (2)$$

式中: $\text{rem}(i \cdot \Delta\phi, 2\pi)$ 为  $i \cdot \Delta\phi$  的值对 2 值取余, $\Delta\phi$ 为相邻电极的相位增量; $\otimes$ 为卷积运算; $\text{rect}(x/d)$ 为门宽为  $d$  的门函数。出射光束在远场的偏转角度  $\theta$  取决于公式(1)。其远场波束取决于夫琅禾费衍射:

$$E_{\text{far}}(\theta) = c \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(x) \exp(-jk_0\theta x) dx \quad (3)$$

当要产生  $N$  个波束时,笔者以电控方式将 LC-OPA 均匀划分为  $N$  个区域,记为  $R_1, R_2, \dots, R_N$ 。其相位分布如图 2 所示。

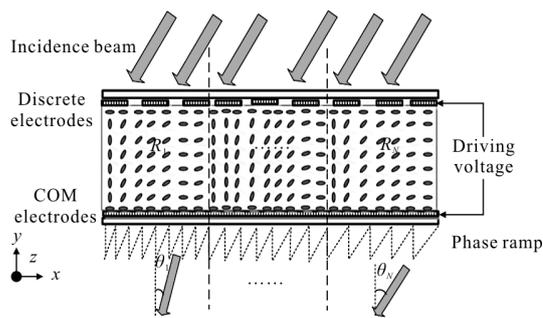


图 2  $N$  个区域的液晶光学相控阵相位分布图

Fig.2 Liquid crystal optical phased array phase distribution map of the  $N$ -region

将相位调制的理想阶梯函数方程,即公式(2)可推导为离散形式,则在 LC-OPA 中第  $i$  根电极上的相位为<sup>[14]</sup>:

$$\phi_i = \text{rem}((i-1)k_0 d \sin\theta, 2\pi) \quad (4)$$

相应的,将在区域  $R_1, R_2, \dots, R_N$  上第  $i$  根电极的相位定义为  $\phi_{iR_1}, \phi_{iR_2}, \dots, \phi_{iR_N}$ 。

$$\phi_i = \begin{cases} \phi_{iR_1} & 0 \leq i \leq M_1 \\ \phi_{iR_2} & M_1 \leq i \leq M_2 \\ \dots & \dots \\ \phi_{iR_N} & M_{N-1} \leq i \leq M_N \end{cases} \quad (5)$$

式中: $M_1, M_2, \dots, M_N$ 分别为第一个,第二个以及第  $N$  个区域的电极数目。

将公式(4)代入公式(5)中,可以得到当高斯光束

入射到 LC-OPA 上时,其相位分布  $\phi(x)$  为:

$$\phi(x) = \begin{cases} \text{rem}((i-1)k_0 d \sin \theta_{R_1}, 2\pi) & 0 \leq i \leq M_1 d \\ \text{rem}((i-1)k_0 d \sin \theta_{R_2}, 2\pi) & M_1 d \leq i \leq M_2 d \\ \text{rem}((i-1)k_0 d \sin \theta_{R_N}, 2\pi) & M_{N-1} d \leq i \leq M_N d \end{cases} \quad (6)$$

当一束高斯光束经过该 LC-OPA 器件调制后,在远场处光束满足相干的条件,其相干重叠区域可以表示为:

$$E_{far} = E_{R_1, far} + E_{R_2, far} + \dots + E_{R_N, far} \quad (7)$$

式中:  $E_{R_1, far}$ 、 $E_{R_2, far}$ 、 $E_{R_N, far}$  分别由  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_N$  区域相位调制所得。

由文中提出的基于液晶光学相控阵的多终端接入模型中,经过 LC-OPA 后的光束偏转角度由下面公式计算<sup>[15]</sup>:

$$\theta = \alpha - \phi \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  为本地通信终端入射光束到达角;  $\phi$  为 LC-OPA 控制光束偏转角度;  $\theta$  为光束经过 LC-OPA 偏转之后相对于系统光轴的光束角度。该公式反映了通过调整 LC-OPA 相控波束偏转后,光束指向发生线性变化的特性。下面通过仿真验证了多终端接入模型中到达角  $\alpha$ 、控制角  $\phi$  及偏转角  $\theta$  之间的关系,如图 3 所示。

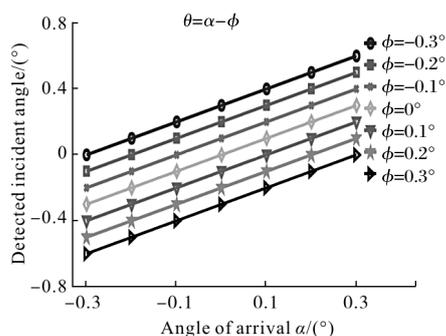


图 3  $\theta$ 、 $\alpha$ 、 $\phi$  之间的关系

Fig.3 Relationship among  $\theta$ ,  $\alpha$ , and  $\phi$

光束最终经过透镜聚焦后在 CCD 上位置信息的计算如下:

$$x = \theta \cdot f \quad (9)$$

式中:  $x$  为 CCD 上光斑中心与系统光轴中心 (光束垂直入射时的中心) 的距离;  $f$  为透镜焦距。

### 1.3 基于液晶光学相控阵多终端接入步骤

为了方便描述接入步骤,先将终端名字定义:多

个待接入的终端分别用  $A_1, A_2, \dots, A_N$  来表示,  $B$  代表本地终端,等待多个目标终端的接入。具体的接入步骤如下:

(1) 根据系统设计,假设接入用户的最大数目  $N$ ;在副 CCD 上设定  $N$  个互不重叠的虚拟中心位置  $x_{0i}$ ;满足  $x_{0i} = f \cdot \theta_{0i}$ ,其中  $\theta_{0i}$  是支路为每个待接入的终端设计的虚拟光轴,  $i=1, 2, \dots, N$ 。副支路通过控制相控阵区域使得待接入光束沿着各自的虚拟光轴到达副 CCD。同时各虚拟光轴之间的间隔应大于光轴的发散角,从而可以避免多个接入光束在副 CCD 上发生光斑重叠。

(2) 当系统开始第一条激光链路的建立和接入。控制中心给副 LC-OPA 发送波控指令,使其生成波束指向角  $\phi_{s1}$  为(其中脚标  $s$  代表“副”,数字 1 代表第一个终端,随后的变量脚标均采用该规则),并且  $\phi_{s1} = \phi_{01}$ ,  $\phi_{01}$  是第一个待接入终端所处不确定区的均值方向,系统进入等待第一个终端接入的阶段。

(3)  $A_1$  终端在一定区域范围之内进行空间扫描。当  $B$  终端副 CCD 获取到  $A_1$  发射过来的信标光,假设此时  $A_1$  发射出的信标光相对  $B$  终端的光束到达角为  $\alpha_{s1}$ 。控制中心通过副 CCD 获取的灰度信息,采用质心法计算出光斑中心偏离系统光轴中心的距离  $\Delta x_1$ ,根据公式(9)得到经过副 LC-OPA 后的光束出射角  $\theta_{s1}$ ,依据公式(8)计算得到  $A_1$  终端相对于  $B$  终端的到达角  $\alpha_{s1} = \phi_{s1} + \theta_{s1}$ 。

(4) 给副 LC-OPA 发送新的波束控制指令,控制角度  $\phi_{s1}^{new} = \alpha_{s1} - \theta_{01}$ ,也即:  $\phi_{s1}^{new} = \theta_{s1} + \phi_{s1}^{old} - \theta_{01}$ 。目的是使得副支路中的光束中心能够处于副 CCD 上的  $x_{01}$  位置,其中  $x_{01} = \theta_{01}$ ,将  $x_{01}$  的位置定义为 CCD 的物理中心位置。

(5) 假设系统已经将主副两支路的光轴标定一致,即:  $\alpha_{m1} = \alpha_{s1}$ ;将到达数据  $\alpha_{s1}$  通过总线直接发送给主支路的波控器,使其  $\phi_{m1} = \alpha_{s1} + \theta_{01}$ ,其中  $\theta_{01}$  是补偿步骤(1)中为了使多个接入光斑不重叠所提前设置的偏转角度。因此光束经过主 LC-OPA 后的偏转角  $\theta_{m1} = \alpha_{m1} - \phi_{m1} = 0$ ,系统光束将垂直入射到主 CCD 的光轴中心,  $B$  终端主支路完成对  $A_1$  终端的粗级捕跟,如图 4 所示。

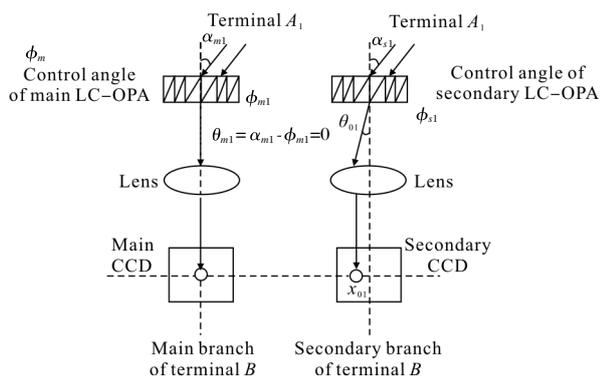


图 4 基于液晶光学相控阵的多终端接入过程一

Fig.4 Multi-terminal access process 1 based on liquid crystal optical phased array

(6) 同时由于两个通信终端均处于动态运动状态,需要基于副 CCD 上的数据,并采用当前主流的动态捕跟算法(例如 PID),通过不断的更新  $\phi_{s1}$ ,使  $B$  终端能够一直处于视场范围之内,并且采集在副 CCD 上的光斑始终处于  $x_{o1}$  位置。因此,  $A_1$  终端的到达角  $\alpha_{s1} = \phi_{s1}^{new} + \theta_{o1}$ ,并将数据共享到主系统  $\alpha_{m1} = \alpha_{s1}$ ,由于终端一直处于运动状态,所以迭代完成步骤(6),使其光束偏转角  $\theta_{m1} = 0$  始终成立,最终完成第一个终端的捕跟控制。

(7) 当终端接收到等待第  $i$  个终端进行接入的信号时,控制中心给副 LC-OPA 发送波控指令。由于此前的第三个至第  $i-1$  个终端经过副控制模型的处理,并且通过总线已经将数据传输到主控制模型,所以此时只需要将副 LC-OPA 划分成两个相同大小的区域。在原先若干个波控角度基础上,再新增加第  $i$  个波束,其中区域 1 用于对第一个终端的偏转角度进行控制;区域 2 用于对第  $i$  个终端的偏转角度控制;并且波束指向角度  $\phi_{s1}$  满足  $\phi_{s1} = \phi_{o1} - \theta_{o1}$ ,  $\phi_{o1}$  是第  $i$  个待接入终端所处不确定区的均值方向。注意到划分区域后,终端  $A_1$  将在区域 2 控制下形成一个新的光斑,将其称为副光斑,后续可通过图像处理将其滤除,图中用虚线表示,该规则对于  $A_i$  同样适用,如图 5 所示。

(8)  $A_i$  终端在一定的区域范围之内进行空间扫描,一旦  $B$  终端的副 CCD 获取到待接入光端机发射过来的信标光,  $A_i$  发射出的激光相对  $B$  终端的光束到达角为  $\alpha_{si}$ 。类似于第(3)~(5)步骤,完成第  $i$  个

终端在副控制模型中的虚拟接入,波束接入到  $\theta_{oi}$  所对应的位置。

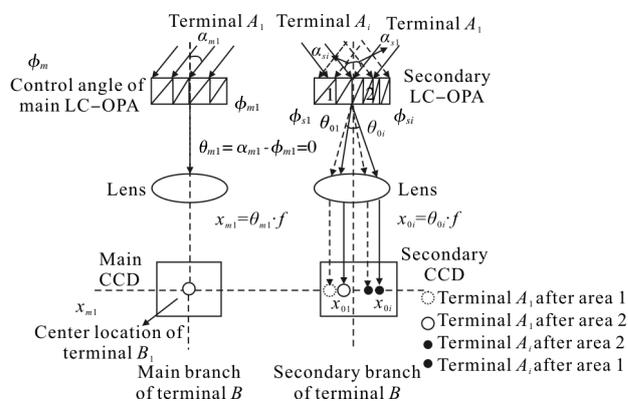


图 5 基于液晶光学相控阵的多终端接入过程二

Fig.5 Multi-terminal access process 2 based on liquid crystal optical phased array

(9) 假设将到达数据  $\alpha_{si} = \phi_{si} + \theta_{si}$  通过总线直接发送给主控制模型的波控器,使其生成新的波束,波束指向方向  $\phi_{mi} = \alpha_{si}$ 。因此光束经过主 LC-OPA 后的偏转角  $\theta_{mi} = 0$ ,系统光束垂直入射到主 CCD 的光轴中心,  $B$  终端主控制模型完成对  $A_i$  终端的粗级捕跟和接入。同时,将在副支路中每个终端形成的副光斑的干扰滤除,如图 6 所示。并且该过程按照类似于步骤(6)进行动态矫正。

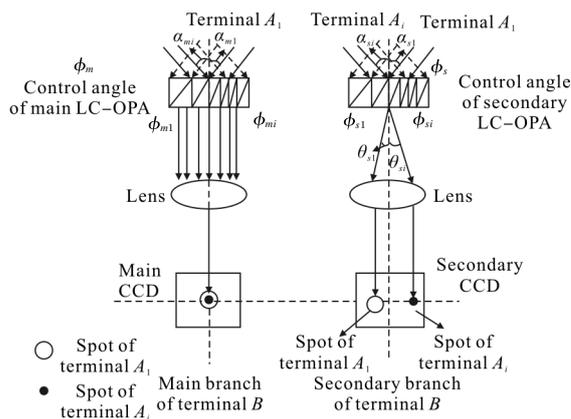


图 6 基于液晶光学相控阵的多终端接入过程三

Fig.6 Multi-terminal access process 3 based on liquid crystal optical phased array

## 2 接入步骤仿真验证

为了方便起见,将仿真中接入终端数量设置为 2。对该设计方案中具体实施步骤进行相应仿真,仿真

条件设定如下。(1) 液晶的材料常数:弹性常数: $k_{11} = 1.37 \times 10^{-12} N$ ,  $k_{22} = 1.07 \times 10^{-12} N$ ,  $k_{33} = 1.68 \times 10^{-12} N$ ; 相对介电常数:  $\epsilon_{\perp} = 4.2 F/m$ ,  $\epsilon_{\parallel} = 12.6 F/m$ ,  $n_o = 1.52$ ,  $\Delta n = 0.3$ , 光学螺距为  $0.366 \mu m$ 。(2) 设定结构参数: 液晶盒厚度为  $9 \mu m$ ; 电极数量为 2 000; 孔径大小为  $1 cm$ ; 光栅周期为  $5 \mu m$ 。

接入步骤可分为五步, 并且对每一步仿真高斯光束远场的能量谱信息和位置信息。

(1) 接入第一个终端  $A_1$ , 到达角  $\alpha_1$  为  $0.1^\circ$ , LC-OPA 控制角  $\phi$  为  $0^\circ$ , 仿真结果如图 7(a)与图 8(a)所示。

由图 8(a)可知, 当接入终端入射角为  $0.1^\circ$  时, 经过相控阵之后在远场距离中心  $0.1$  位置处有光斑。此位置信息与理论值符合, 并且通过观察图 7(a)可知, 激光光束的能量集中在  $0.1$  位置处, 效率达到 95% 以上。

(2) 将 LC-OPA 控制角  $\phi$  调整为  $0.1^\circ$ , 此时光斑将移至远场的中心位置, 表示完成对终端  $A_1$  的接入。仿真结果如图 7(b)与图 8(b)所示。

从图中可以看到, 通过对 LC-OPA 偏转角度的控制, 使得入射角度为  $0.1^\circ$  的终端经过 LC-OPA 后偏转到 CCD 中心位置, 在远场体现如图 8(b)所示; 光斑位于远场中心处, 光斑中心颜色最深, 对应图 7(b)中光束主要能量都在中心处, 所占能量大于 95%, 表

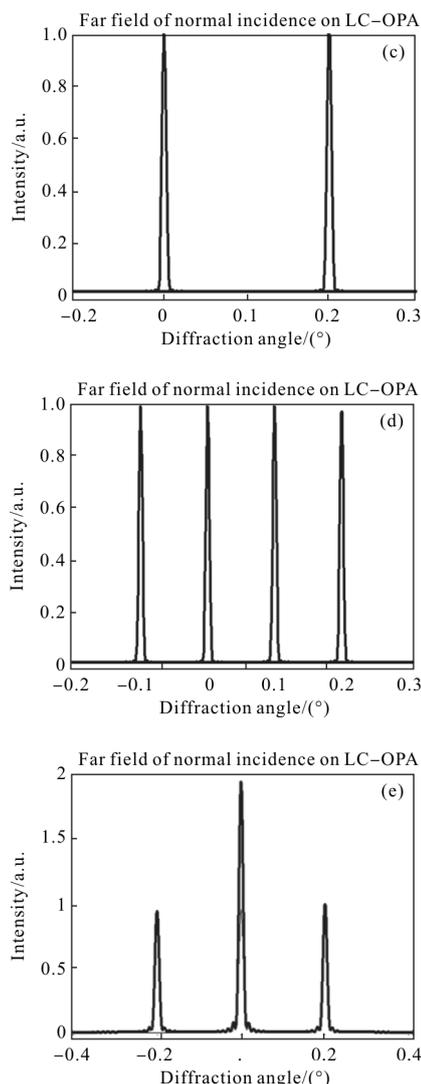
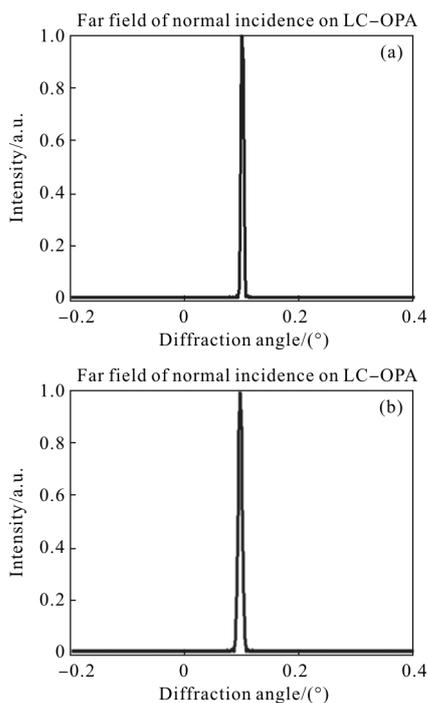
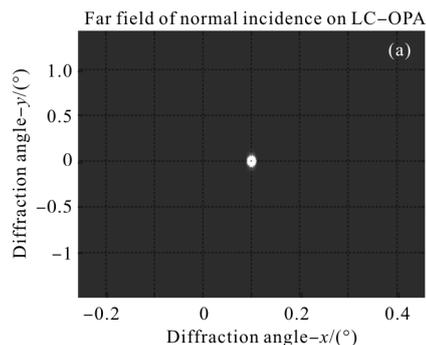


图 7 接入过程中高斯光束远场的能量谱仿真  
Fig.7 Simulation of energy spectrum of Gaussian beam far field in access procedure

明终端已经成功接入。

(3) 开始接入终端  $A_2$ ,  $A_2$  到达角  $\alpha_2$  设置为  $0.3^\circ$ , LC-OPA 控制角  $\phi$  仍为  $0.1^\circ$ 。理论上此时将在远场坐标  $0$  和  $0.2$  位置有两个光斑, 分别对应终端  $A_2$  与



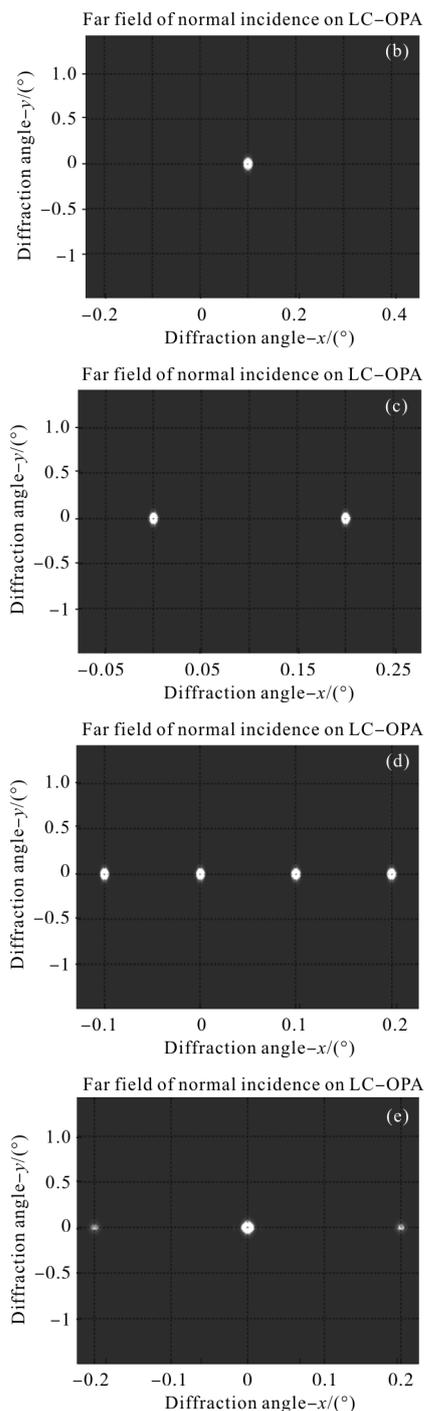


图 8 接入过程中高斯光束远场的位置信息仿真

Fig.8 Simulation of position information of Gaussian beam far field in access procedure

$A_1$ 。仿真结果如图 7(c)与图 8(c)所示。

从图 8(c)中可知,到达角分别为  $0.1^\circ$ 、 $0.3^\circ$  的终端  $A_2$  与  $A_1$  经过偏转角为  $0.1^\circ$  的相控阵之后,准确的偏转到了 CCD 上的中心及  $0.2$  的位置;从图 7(c)中可以看出多个终端的接入对能量效率的影响不

大,每个终端的效率都在 90%以上。

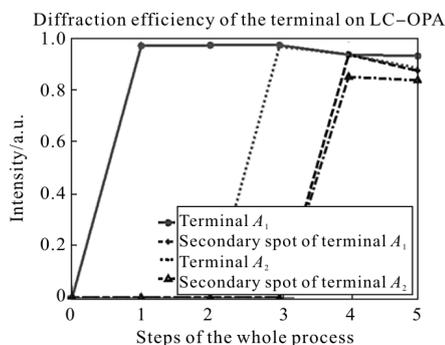
(4) 此时终端  $A_1$ 、 $A_2$  的入射激光已经到达接入系统。到达角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为  $0.1^\circ$ 、 $0.3^\circ$ ,此时将 LC-OPA 划分为两个区域,控制角度  $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别为  $0.1^\circ$ 、 $0.2^\circ$ 。理论上此时在坐标  $-0.1$ 、 $0$ 、 $0.1$ 、 $0.2$  的位置有四个光斑。仿真结果如图 7(d)与图 8(d)所示。

进行这步仿真的目的是验证将 LC-OPA 进行划分区域设置后,终端的入射激光经过相控阵之后是否能在两个指定的位置上得到光斑信息。从图 8(d)中可知,终端  $A_1$  在坐标  $-0.1$ 、 $0$  两个位置上采集到了光斑,而终端  $A_2$  在坐标  $0.1$ 、 $0.2$  两个位置上采集到光斑;并且结合图 7(d)可知将 LC-OPA 区域划分后对于终端接入的能量效率影响不大。

(5) 此时将 LC-OPA 两个区域的控制角度  $\phi_1$  和  $\phi_2$  调整为  $0.1^\circ$ 、 $0.3^\circ$ ,理论上在坐标  $-0.2$ 、 $0$ 、 $0.2$  的位置将会有三个光斑。仿真结果如图 7(e)与图 8(e)所示。

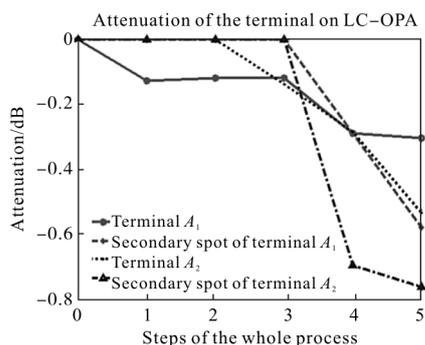
笔者将  $\phi_1$  和  $\phi_2$  设置为  $0.1^\circ$ 、 $0.3^\circ$  的目的是将终端  $A_1$ 、 $A_2$  通过 LC-OPA 的控制都偏转到 CCD 的中心位置,从图 8(e)中可知,此时在远场的  $-0.2$ 、 $0$ 、 $0.2$  的位置有三个光斑,并且在中心处的光斑能量最强,说明终端  $A_1$ 、 $A_2$  都有偏转到 CCD 的中心位置,而在  $-0.2$  和  $0.2$  的位置上是两个终端的激光通过 LC-OPA 上另一块区域的呈现。结合图 7(e)的能量谱状况,仿真结果符合之前的理论分析。

对于整个接入的过程,以每个过程光束的衍射效率及其衰减状况为指标来衡量终端接入的情况,接入条件需要满足光束衍射效率  $\geq 75\%$  以及衰减  $< 3\text{dB}$ 。通过仿真可以得到如图 9(a)和(b)的结果。



(a) 接入过程中终端的效率情况

(a) Efficiency of the terminal in the access process



(b) 接入过程中终端的衰减情况

(b) Attenuation of the terminal in the access process

图 9 终端的接入过程

Fig.9 Terminal access procedure

从图9(a)中可以看出,随着接入过程的进行,每个终端的衍射效率都在降低。尤其是在第四个过程开始,衍射效率有着明显的下降;原因在于将液晶光学相控阵划分成了两块区域,从而降低了光束的衍射效率。接入过程中终端未接入时其衍射效率的默认值设为 0,即图 9(a)中纵坐标为 0 的各点。对于所有终端,包括其主光斑和副光斑的衍射效率都在 80%以上,满足接入条件。

从图 9(b)中可以看出,随着终端接入过程的进行,每个终端的衰减都在增加,尤其是从第四个过程开始,即将液晶光学相控阵划分成了两块区域,终端接入的衰减明显增大。而且到达角越大,衰减越高;液晶光学相控阵的控制偏转角越大,衰减越高。但是所有衰减仍小于 3 dB,该结果表明所有步骤都满足接入条件。接入过程中终端未接入时其衰减的默认值设为 0,即图 9(b)中纵坐标为 0 的各点。

从图 9(a)中可以看出,接入的五个过程中终端的效率始终高于终端;说明到达角越大,衍射效率越低,副光斑的衍射效率都小于相同终端的主光斑。图 10 仿

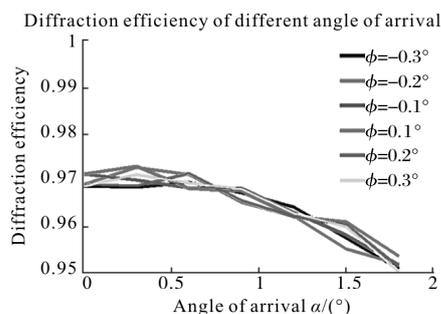


图 10 不同到达角的衍射效率

Fig.10 Diffraction efficiency of different angle of arrival

真结果表明到达角从 0°增大到 1.8°,在不同相控阵偏转角度下,衍射效率随到达角变化的规律。该规律也反映了到达角越大,衍射效率越低的趋势。

### 3 结论

当前激光通信的捕跟系统多采用机械式的光束控制方式。为了增加空间激光通信组网的灵活性与可靠性,文中研究了使用液晶光学相控阵的非机械式光束控制方法。基于液晶光学相控阵的偏转控制原理和生成多波束的原理,文中提出了一种采用主副支路设计的接入方法来解决空间激光通信过程中多个终端接入的问题。通过使用两套液晶光学相控阵并将其划分区域来实现多个偏转角度的控制;采用该方法设计的多终端接入系统能满足结构简单、体积小、质量轻等要求。论文详细阐述了采用该方法进行多终端接入的步骤,并且在两个待接入终端以及一定的器件条件设定下对整个接入的过程进行了仿真分析。由仿真结果可以知道,接入过程中的衍射效率大于 80%,能量损耗小于 1 dB,数据表明该接入方法有效可行。

### 参考文献:

- [1] Fu Qiang, Jiang Huilin, Wang Xiaoman, et al. Research status and development trend of space laser communication [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 116-125. (in Chinese)  
付强, 姜会林, 王晓曼, 等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. *中国光学*, 2012, 5(2): 116-125.
- [2] Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communications [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 670-680. (in Chinese)  
吴从均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述 [J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 670-680.
- [3] Jin Guang, Li Yanjie, Zhong Xing, et al. Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2067-2074. (in Chinese)  
金光, 李艳杰, 钟兴, 等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2067-2074.
- [4] Jiang Huilin, Jiang Lun, Song Yansong, et al. Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system [J]. *Chinese*

- Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0405008. (in Chinese)
- 姜会林, 江伦, 宋延嵩, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405008.
- [5] Chen Li, Du Peng, Yan Hong, et al. Progress and applied analysis of the optical phased array in beam steering [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(4): 351–355. (in Chinese)
- 陈黎, 杜鹏, 颜宏, 等. 光学相控阵在光束偏转中的应用分析及进展[J]. 激光与红外, 2013, 43(4): 351–355.
- [6] Stockley J, Serati S. Multi-access laser terminal using liquid crystal beam steering [C]//2005 IEEE Aerospace Conference, 2005: 1972–1977.
- [7] Serati S, Masterson H, Linnenberger A. Beam combining using a phased array of phased arrays (PAPA) [C]//Aerospace Conference, 2004, 3: 1729.
- [8] Dang A. Simultaneous acquisition and track scheme with multiple terminals based on subspace method for optical satellite networks [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(1): 263–277.
- [9] Kong Lingjiang, Zhu Ying, Song Yan, et al. A beam steering approach of liquid crystal phased array based on non-periodic blazed grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0123001. (in Chinese)
- 孔令讲, 朱颖, 宋艳, 等. 基于非周期闪耀光栅的液晶相控阵波控方法研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0123001.
- [10] Zhao Bin, Zhao Changming, Yang Suhui, et al. Performances analysis of optical phased array scanning based on blazed phase grating[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 341–346. (in Chinese)
- 赵彬, 赵长明, 杨苏辉, 等. 利用相位闪耀光栅的光学相控阵扫描性能分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 341–346.
- [11] Perry M J. Using liquid crystal spatial light modulators for closed loop tracking and beam steering with phase holograpy [D]. Ohio: Air Force Institute of Techonlogy, 2005.
- [12] Wang Xiangru, Tan Qinggui, Huang Ziqiang, et al. Dual beam formation and 2-D scan technique of liquid crystal optical phased array [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(5): 631–635. (in Chinese)
- 汪相如, 谭庆贵, 黄子强, 等. 液晶光学相控阵的双波束成形和 2 维扫描技术[J]. 激光技术, 2013, 37(5): 631–635.
- [13] Zhu Ruifei, Jia Hongguang, Wang Chao, et al. Enhancement of image detail and contrast by parameterized logarithmic framework [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 1064–1070. (in Chinese)
- 朱瑞飞, 贾宏光, 王超, 等. 应用参数化对数模型增强图像细节及对比度[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 1064–1070.
- [14] Tang Z, Wang X, Huang Z, et al. Sub-aperture coherence method to realize ultra-high resolution laser beam deflection [J]. *Optics Communications*, 2015, 335: 1–6.
- [15] Wu L, Wang X, Xiong C, et al. Steering performance of oblique arriving beam propagating through liquid crystal optical phased array [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(11): 116115.