

空间光通信中高频大功率激光调制器分析及设计

詹伟达^{1,2} 李洪祚^{1,2} 王志坚^{1,3} 姜会林¹

¹ 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022
² 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022
³ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 空间光通信中激光调制器的调制频率和输出光功率直接影响光通信速率和链路距离。为兼顾高调制频率和大输出光功率两个指标, 提出采用横向调制、组合调制等方法, 开展铌酸锂晶体结构及参数优化、光耦合设计及功率计算、射频驱动源设计、自动偏置设计等关键技术分析, 设计了一个最高调制频率达 1238 MHz, 输出光功率大于 1 W 的激光调制器, 其半波电压约 266 V, 调制深度约 1.39 rad, 折减系数约 0.99, 消光比约 20 dB。实验证明, 激光调制器的设计指标和实验结果基本相符, 成功地应用于误码率优于 10^{-9} , 链路距离大于 7 km 的空间光通信地面演示验证实验中, 具有应用于临近空间、深空光通信的可行性。

关键词 空间光通信; 铌酸锂晶体; 横向调制; 组合调制

中图分类号 TN929.13

OCIS 060.0060 060.4080

文献标识码 A

High-Frequency and High-Power Laser Modulator in Space Optical Communications

Zhan Weida^{1,2} Li Hongzuo^{1,2} Wang Zhijian^{1,3} Jiang Huilin¹

¹ Institute of Space Photonics, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

³ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The modulator frequency and output power directly affect the communication rate and link distance in the space optical communications. Considering two specifications of high modulation frequency and high output optical power, a method of adopting transverse modulation and combined modulation is proposed, and LiNbO₃ (LN) crystal structure and parameter optimization, optical coupling design and power calculation, RF-driven source design, technical analysis of automatic bias are carried out. A laser modulator is designed whose maximum modulation frequency is up to 1238 MHz, output optical power is greater than 1 W, half-wave voltage is about 266 V, maximum phase delay is about 1.39 rad, reduction factor is about 0.99, and extinction ratio is about 20 dB. Experiments show that the theoretical design is consistent with experimental results, and the laser modulator can be applied to the space optical communication demonstration experiments on the ground whose bit error rate is better than 10^{-9} and the link distance is more than 7 km. It can also be applied in the near space or deep space optical communications.

Key words space optical communications; LiNbO₃ crystal; transverse modulation; combined modulation

收稿日期: 2010-08-20; 收到修改稿日期: 2010-09-30

基金项目: 国家 863 计划(2008AA01Z225)资助课题。

作者简介: 詹伟达(1979—), 男, 硕士研究生, 讲师, 主要从事空间光通信方面的研究。E-mail: zhanweida@cust.edu.cn

导师简介: 李洪祚(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间光通信和光电子技术等方面的研究。

E-mail: lihongzuo@sohu.com

1 引言

空间激光通信是以激光为载波,在空间信道进行数据传输的一种通信方式,具有通信速率高、信息容量大、抗干扰能力强、保密性好等优点,应用前景非常广阔。激光调制是利用某些晶体或液体的电光效应把欲传输的信息加载于激光载波的技术,完成信息加载过程的设备称为激光调制器,是空间光通信系统的核心单元之一^[1]。美国、日本、欧州在空间光通信和激光调制等方面取得了较多成果,先后完成了理论研究、仿真分析、关键技术、演示验证和工程应用等。国内光纤通信发展比较迅速,光纤通信用激光调制器研究较多,但是空间光通信用激光调制器研究较少,能够兼顾高频率和大功率的激光调制器少有报道,激光调制器的研究已经成为我国空间光通信发展的瓶颈之一^[2]。目前,调制频率为 40 GHz 的调制器已经商业化,调制频率为 160 GHz 的调制器正处于实验室研究阶段,但是高速调制器输出光功率较低,仅仅能实现几个或几十毫瓦,主要用于光纤通信,远远不能满足空间光通信的功率要求;电光调制属于外调制方式,其主要特点是能够实现瓦级光功率输出,调制频率也可以满足空间光通信需要^[3]。本文以铌酸锂(LN)晶体的线性电光效应为基础,通过对关键技术的研究和分析,设计了一个高频率、大功率的激光调制器,并开展了相关实验工作。

2 LN 激光调制物理基础

电光晶体的线性电光效应比二次电光效应的作用效果明显,因此多采用线性电光效应设计激光调制器^[4]。激光调制器可分为纵向调制和横向调制两种方式,在纵向调制中,外加调制电场平行于光的传播方向,而横向调制的外加调制电场则垂直于光的传播方向,横向调制可以减少渡越时间对调制器带宽的限制,有利于提高调制频率。由于 LN 晶体具有较大的电光系数、较大折射率、较小介电常数等优势,并且生长技术成熟,机械性能较好,所以选用 LN 晶体作为高频率、大功率激光调制晶体^[5]。LN 晶体具有 3m 的晶体对称性, r_{51} 为低频参数, r_{13} 、 r_{33} 、 r_{22} 为高频参数,单位为 10^{-12} m/V,其电光张量可表示为

$$\mathbf{r}_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -3.4 & 8.6 \\ 0 & 3.4 & 8.6 \\ 0 & 0 & 30.8 \\ 0 & 28 & 0 \\ 28 & 0 & 0 \\ -3.4 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

对电光效应分析和描述主要采用相对简单的折射率椭球法。当晶体的外加调制电场沿着 z 轴方向时,且晶体保持单轴非均匀性,光束沿着 x 轴传播,即采用横向调制方式,晶体的折射率椭球方程^[6,7]为

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13}E\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13}E\right)y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33}E\right)z^2 = 1, \quad (2)$$

式中 n_o 和 n_e 为正常和非常折射率指数。从(2)式可看出,新折射率椭球主轴保持不变,式中没有交叉项,新椭球半轴长分别为

$$n_x = n_o - \frac{1}{2}n_o^3r_{13}E, \quad n_y = n_o - \frac{1}{2}n_o^3r_{13}E, \quad n_z = n_e - \frac{1}{2}n_e^3r_{33}E. \quad (3)$$

设从晶体入射的光为线偏振光,波长为 λ ,晶体 x 轴方向长度为 l ,外加调制电场为 E ,在晶体 z 轴和 y 轴产生的两个光波分量之间的相位差为

$$\Delta\varphi_{yz} = \frac{2\pi}{\lambda}(n_z - n_y)l = \frac{2\pi}{\lambda} \left[(n_e - n_o)l - \left(\frac{1}{2}n_e^3r_{33}E - \frac{1}{2}n_o^3r_{13}E \right)l \right]. \quad (4)$$

从(4)式可以看到 z 轴和 y 轴电光效应使光束通过晶体后 o 光和 e 光的相位差分为两项:第一项是由晶体自然双折射引起的相位延迟,它不受调制电场影响,而且温度的变化会引起晶体折射率变化并导致相位漂移,会使调制光发生畸变,甚至使调制器不能正常工作;第二项是希望得到的在外加调制电场作用下光束产生的相位差,其和调制电场和晶体长度有关, r_{13} 和 r_{33} 电光系数较大,可以获得明显的电光效应^[8]。为了克服晶体自然双折射的影响,可以采用两个尺寸相同晶体串联的组合调制方式,即在两个尺寸相同的晶体之间加一个 $\lambda/2$ 波片补偿,使 o 光和 e 光在进入第二个晶体前产生 90° 偏转。

采用双 LN 晶体串联组合调制方式,半波电压比单晶调制的半波电压减少了一半,由于外加调制电场的大电压幅度和高频率二者不容易兼顾,所以有效地降低半波电压对提高调制电场的频率具有积极意义,采用双晶串联的组合调制方式可以使调制器输出光功率达到 1000 MHz 以上。LN 晶体抗光损伤能力对连续激光为 60 W/cm^2 , 对脉冲激光为 25 W/cm^2 , 完全可以满足本激光调制器关于功率的需要。

3 调制器结构设计及参数优化

3.1 调制器结构设计

激光调制器由光纤、准直器、起偏器、电光调制晶体单元、检偏器、射频驱动信号源、光接收器等单元组成。光接收器将光信号转化成电信号,电信号送入驱动器以构成闭环反馈控制系统。激光器输出激光经过光纤入射到准直器中,准直器一般选用长光程自聚焦透镜,光束经过准直器整形后,经过起偏器入射到电光调制晶体单元,由于线性电光效应的作用,加载到电光晶体上的射频信号可以改变晶体中激光光束 o 光和 e 光建的相位差,电光晶体出射激光通过检偏器后完成强度调制。各组成单元的连接关系和连接形式见 3.7 节。

3.2 LN 晶体结构设计及参数计算

3.2.1 晶体数量及尺寸设计

选用两个 LN 晶体,晶体折射率指数 n_o 和 n_e 分别为 2.286 和 2.200,具体见(1)式,晶体的长宽分别为 20 mm,3 mm。采用两个晶体串联,第一个晶体光束沿 x 轴方向传播,外加调制电场方向和 z 轴平行,第二个晶体光束沿 y 轴方向传播,调制电场方向和 z 轴平行。

3.2.2 总相位差及半波电压计算

为了满足大气的低损耗窗口,选择光波长 λ 为 810 nm,方波电压幅度 V_m 为 120 V,直流偏置电压 133.2 V,外加直流电场 $E = V/d$ (d 为晶体 z 轴和 y 轴方向宽度), $2\pi(n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13})/\lambda$ 记为 α ,则两个晶体产生总相位差为

$$\Delta\varphi_0 = \Delta\varphi_{yz} + \Delta\varphi_{xz} = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13})El = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13})\frac{l}{d}V = \alpha \frac{l}{d}V, \quad (5)$$

令 $\Delta\varphi_0 = \pi$,可以得到能提供相位差大小为 π 的半波电压^[9]为

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2(n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13})} \cdot \frac{d}{l} = \frac{\pi d}{\alpha l}. \quad (6)$$

光波长、晶体长宽比和外加调制电压对相位差和半波电压的影响如图 1 所示。从图 1 可以看出,半波电压与晶体长宽比的倒数呈线性对应关系,晶体宽度越小,对应的半波电压越小。相位差与晶体长宽比成线性对应关系,晶体长度越大,相位差越大。根据(1)式,(5)式和图 1 可得到最大相位延迟 $\Delta\varphi_m$ 为 1.3971 rad。根据(6)式可计算得到半波电压 V_π 为 266.41 V。

设外加正弦变化的沿 z 轴方向的调制电场,光束沿 x 轴或 y 轴传播,则晶体对光束折射率 $n = n_o$,设电极对调制电场折射率为 n_m ,由于晶体对光束的折射率和电极对电场的折射率不相等时会产生速度失配。设折射率差为 $\Delta n = n - n_m$,光束在两个晶体中的渡越时间为 $\tau = 2nl/c$ 。则交流调制电场引起的光束相位延迟为

$$\Delta\varphi = \alpha(c/n)\tau E_m \cdot \frac{\sin[\omega_m \tau(\Delta n/n)/2]}{\omega_m \tau(\Delta n/n)/2} \cdot \cos[\omega_m t + \omega_m \tau(\Delta n/n)/2], \quad (7)$$

式中直流电场 E_m 引起的相位差 $\Delta\varphi_0 = \alpha(c/n)\tau E_m = \alpha Vl/d$ 。

外加调制电场对相位延迟的影响如图 2 所示,结合(7)式可看出,当晶体长度增加时, $\omega_m \tau(\Delta n/n)/2$ 项也将增加,其对相位延迟具有幅度调制特性,并且增加晶体长度会限制最高调制频率,为了得到较高的调制

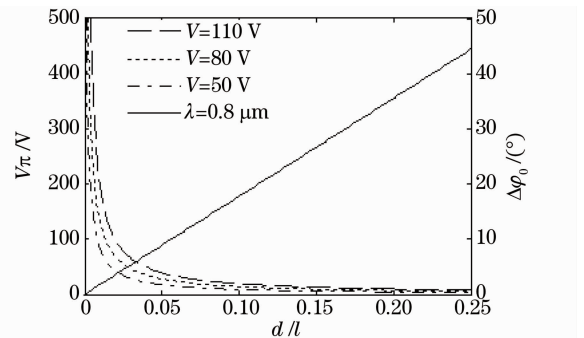


图 1 晶体长宽比对相位差、半波电压的影响
Fig. 1 Curve of crystal aspect ratio affecting phase and half-wave voltage

深度,需要折中选取晶体长度和调制频率,所以选取晶体长度为20 mm。

3.2.3 折减系数计算

调制器的折减系数可表示为

$$\eta = \frac{\sin[\omega_m \tau (\Delta n/n)/2]}{\omega_m \tau (\Delta n/n)/2}. \quad (8)$$

调制频率对折减系数的影响可见图3。从图3可看出,调制频率和晶体长度对折减系数影响很大,晶体长度越大,折减系数越小;当调制频率1000 MHz左右时,折减系数约为0.99,所以可以实现1000 MHz以上的调制频率。当调制频率大于2000 MHz时,折减系数小于0.5,且相位延迟减小一半以上。结合图1可以看到,晶体长宽比的选择需要综合考虑其对半波电压、相位差和折减系数的影响^[10]。

3.2.4 调制深度及最高调制频率计算

根据 $\Delta\varphi = \delta \cos[\omega_m t + \omega_m \tau (\Delta n/n)/2]$, 结合(7)式,调制深度可表示为

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_m \sin\left(\omega_m \Delta n \frac{l}{c}\right) = \\ \alpha(c/n)\tau E_m \cdot \frac{\sin[\omega_m \tau (\Delta n/n)/2]}{\omega_m \tau (\Delta n/n)/2} &= \\ \frac{2\alpha E_m}{\omega_m \Delta n} \sin\left(\omega_m \Delta n \frac{l}{c}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

结合(9)式,当调制电压不同时,调制频率对调制深度的影响如图4所示。可以看出,调制频率对调制深度影响也较大,在调制频率为500~1000 MHz时,调制深度略小于1。

由(9)式可以得到最高调制频率为

$$f_m = \frac{c}{8l\Delta n}. \quad (10)$$

当调制电场频率分别为500 MHz和1000 MHz时,分别计算折减系数、调制深度、透射率、消光比,电极折射率为3.8。根据(8)式可计算得到折减系数分别为0.9998和0.9957,折减效应几乎可以忽略;根据(9)式可计算得到调制深度分别为1.3968和1.3910;根据(10)式可计算得到最高调制频率 f_m 为1238.44 MHz,完全可以满足空间光通信需要。

3.2.5 透射率及消光比计算

当直流偏置电压 $V_0 = V_\pi/2$ 时,设调制电压为正弦波,透射率 T 为输出和输入光强比,即

$$T = \frac{I_o}{I_i} = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V}{V_\pi}\right) = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_\pi/2 + V_m \sin \omega_m t}{V_\pi}\right) = \sin^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Delta\varphi_0}{2} \sin \omega_m t\right), \quad (11)$$

当工作点选定 $V_0 = V_\pi/2, V_m \ll V_\pi$ 时,可获得较高效率的线性调制,则

$$T = \frac{I_o}{I_i} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin(\Delta\varphi_0 \sin \omega_m t), \quad (12)$$

当直流偏置电压 $V_0 = 0$ 或 $V_\pi, V_m \ll V_\pi$ 时,将会出现“倍频”失真。

调制电压和晶体长宽比对最大透射率的影响如图5所示。可以看出,综合考虑晶体的长宽比,调制电压

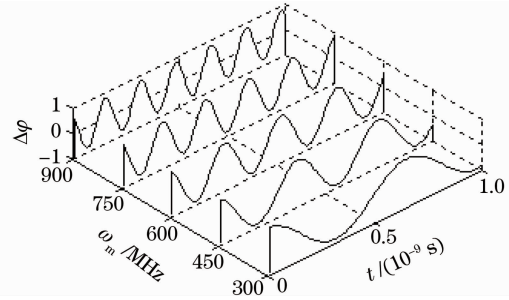


图2 调制电场对相位延迟的影响曲线

Fig. 2 Curve of modulation field affecting phase delay

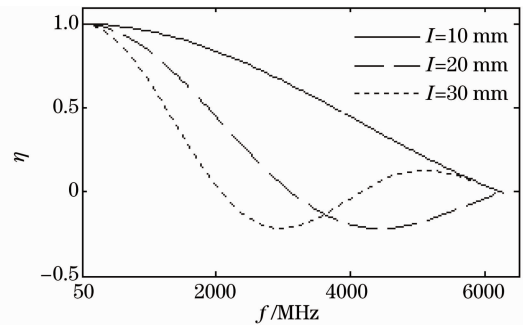


图3 调制电场频率和晶体长度对折减系数的影响曲线

Fig. 3 Curve of field frequency and crystal length affecting reduction factor

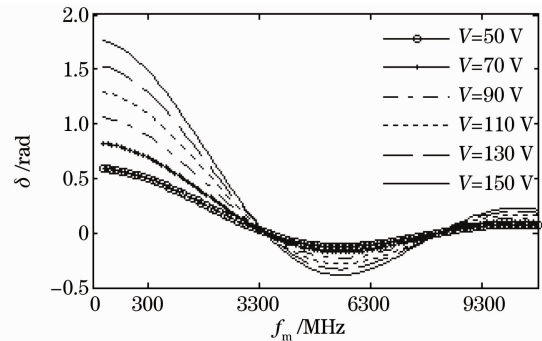


图4 调制频率和调制电压对调制深度的影响曲线

Fig. 4 Curve of modulation frequency and voltage affecting modulation depth

选取合适的数值,可以得到最大透射率的极大值。根据(11)式可计算得到最大透射率分别为 0.99245 和 0.99194,最小透射率分别为 0.00733 和 0.00806;消光比分别为 135.39 和 123.07。

3.3 耦合设计及功率计算

光纤接触头损耗严重,所以直接将半导体激光器尾纤与自聚焦透镜固化,尽量减少光纤插入损耗,提高耦合效率^[11,12]。选用光纤的芯径为 100 μm 、数值孔径(NA)为 0.22,长光程自聚焦透镜长度为 300 mm 的半导体激光器。

设 LN 晶体内光束发散角为 $2\theta'$, d 为晶体的 x 轴和 y 轴方向的宽度,则折算到入射到晶体端面的光斑直径可表示为

$$a = d - 2l\theta'. \quad (13)$$

设实际入射到晶体端面的光斑直径为 a_0 ,则实际光斑与从出射端面折算到入射端面的最大光斑的面积比为

$$k = \frac{a_0^2}{a^2} = \frac{a_0^2}{(d - 4l\theta')^2}, \quad (14)$$

把光斑看成是均匀的,不考虑其他损耗,激光的孔径利用效率等于面积比 k 。从(14)式可看出,提高第一个晶体 y 轴和第二个晶体 x 轴方向长度 l 可提高孔径利用效率。

经自聚焦透镜整形和压缩后光束发散角的最大全角为 2θ 。晶体内光束发散角为

$$2\theta' = \frac{2\theta}{n_o}. \quad (15)$$

晶体出射端面光斑直径为

$$d_0 = a_0 + 4l\theta'. \quad (16)$$

通过半导体激光器数据手册查得,自聚焦透镜出射端面光斑直径 a_0 为 2 mm,自聚焦透镜出射端面光束发散角 2θ 为 0.02 rad。选用晶体的长度 l 为 20 mm,高度和宽度为 3 mm,通过(14)式计算知孔径利用效率为 87.1%,通过(16)式计算得晶体出射端面光斑直径为 2.35 mm。

3.4 抗光损伤能力及功率分析

半导体激光器经准直镜的孔径角小于 3° ,选择光锥角为 4.7° ,棱镜底角 38.5° ,中间介质为空气的格兰棱镜作为偏振器。偏振棱镜对入射光能密度有限制,一般其抗光损伤能力对连续激光为 $60 \text{ W}/\text{cm}^2$,对脉冲激光为 $25 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。选用半导体激光器功率密度最大为 $50 \text{ W}/\text{cm}^2$,满足格兰棱镜的抗损伤能力要求^[13]。

3.5 射频驱动源设计

激光调制器驱动系统包括供电电源、静态偏置自动控制电路、温控电路、宽带射频锁相环电路及宽带功率放大电路。直流偏置电压范围 120~150 V 可调、最高调制频率 1200 MHz;带宽 100~1500 MHz;最大输入信号电压峰峰值低于 1 V;高增益宽带功率放大器放大增益 40 dB;供电电源 220 V;偏置电压自动控制精度 $\pm 1 \text{ V}$ 。

3.6 自动偏置技术

激光调制过程中,使光调制信号不失真地反映外加电压的变化,激光调制器的静态工作点应选在线性变化段的中点附近。传统的偏置方式有两种:一种是在光路中加 $\lambda/4$ 波片产生 $\pi/2$ 初始相位差;另一种是加固定直流偏置电压。传统方式的缺点是当晶体半波电压发生变化时,静态偏置点不能随之变化。采用了静态工作点自动控制技术,保证静态偏置电压始终跟随半波电压变化,并保持在线性区的中点。

3.7 安装与调试

半导体激光器和准直器间采用光纤连接,电光调制晶体单元和驱动器间采用高频同轴电缆连接,光接收器和驱动器间采用光电耦合连接,射频驱动器的信号采用高频同轴电缆传输。整个激光调制器固定在一个

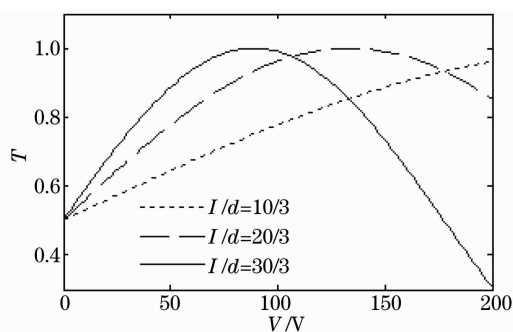


图5 调制电压和晶体长宽比对透射率的影响曲线

Fig. 5 Curve of modulation voltage and crystal aspect ratio affecting modulation depth

长方体盒内,准直器、起偏器、光接收器 1、电光调制晶体、检偏器、光接收器 2 依次通过调整架安装在底座上,经过精密调整光路后,用锁紧螺钉将各个调整架和底座固定,电光晶体单元需要和底座绝缘。考虑到整个框架结构的稳定性,在装配调试完成后,调整架和底座固定用螺纹的联接处点胶固定。

4 实验及结果

4.1 实验系统

实验系统示意图如图 6 所示,可开展调制器测试实验和空间光通信演示验证实验。系统由半导体激光器、光纤准直器、电光调制单元、驱动单元、探测单元、信号处理单元等部分组成。光纤准直器采用长光程自聚焦透镜;电光调制单元由起偏器、电光晶体(两个)、检偏器、电极等部分组成;驱动单元由信号源和驱动器部分组成;探测单元由光功率计和误码仪等部分组成;信号源和误码仪配套使用,便于信号处理及分析。

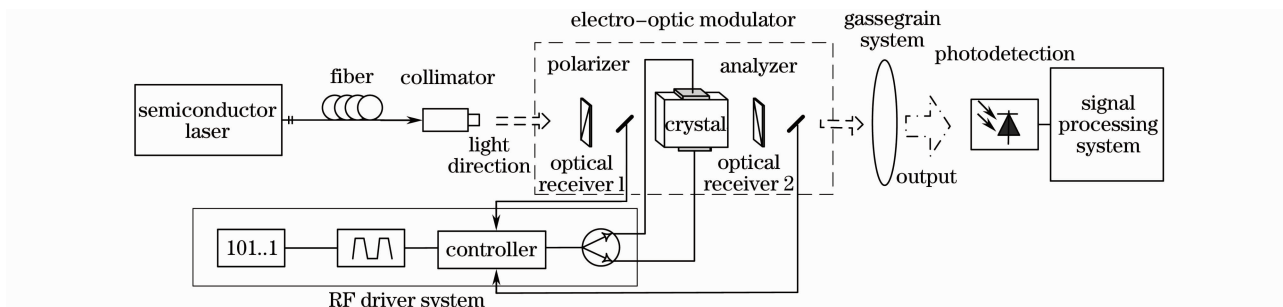


图 6 空间光通信实验系统示意图

Fig. 6 Diagram of experimental system in space optical communications

调制器测试实验选用半导体激光器,波长为 810 nm,功率为 3~5 W 可调,采用保偏光纤和 300 mm 自聚焦透镜固化连接,自聚焦透镜输出光斑直径为 2 mm,发散角为 0.02 rad。光功率计直接测试激光器输出光功率和调制器输出光功率。

空间光通信实验需要连接发射和接收光学系统,发射天线直径 10 cm,接收天线直径 38 cm;探测器灵敏度 250 nW;链路距离 7.37 km(受自动跟瞄系统、探测系统、光学天线等实验条件限制);手动跟踪瞄准。楼 A 架设光发射系统,楼 B 架设光接收系统,楼间无遮挡。市区内,冬天,室外温度 -15°C ,微风 3 级,晴朗。光功率计测试激光器输出光功率、调制器输出光功率,楼 B 接收后端接收功率,信号源配合误码仪测试通信误码率。

4.2 实验结果

通过图 6 实验系统主要开展 3 个实验:1)激光调制器静态性能测试实验:通过加载直流驱动信号,主要测量光斑直径、光束发散角、最大功率、损耗等技术指标,验证理论分析及设计方法的合理性,进一步开展误差分析和系统优化设计。2)激光调制器动态测试实验:通过加载方波射频驱动信号,主要测量调制频率、偏置电压、消光比等技术指标的合理性,验证调制器调制频率和消光比是否满足预计设计指标。3)空间光通信实验:由于激光调制器主要用于空间光通信中,通过实验主要验证调制器的输出光功率、调制频率是否能够成功应用于具有较低误码率、一定链路距离的空间光通信中,以验证激光调制器的实际应用可行性。

调制器静态和动态实验测试结果分别见表 1,2。空间光通信地面演示验证实验测试结果见表 3。

表 1 激光调制器静态性能测试结果

Table 1 Results of static performance test on laser modulator

	Output power /W	Diameter /mm	Loss /dB	Divergence angle of transmitting beam /rad
Self-focusing fixed lens	3.3	2		0.021
Modulator	1.137	2.35	4.627	0.00887

表 2 激光调制器动态测试结果

Table 2 Results of dynamic test on laser modulator

Lens		Signal source			Modulator		
Output power / mW	Frequency / MHz	Voltage / V	Amplitude / V	Max output power /mW	Min output power /mW	Extimtion ratio	
1050	500	130	120	883	8.09	109.15	
500	1000	130	120	397	3.93	101.01	

表 3 空间光通信实验结果

Table 3 Results of experiments in space optical communications

Modulator		Signal source		Out-power	In-power of	Communication link		Communication bit error rate
Output power /mW	Frequency / MHz	Voltage / V	Amplitude / V	transmitting antenna /mW	receiving antenna /mW	Distance / km	Loss / dB	
350	1000	130	120	200	0.067	7.37	34.7	10^{-9}
500	500	130	120	280	0.083	7.37	35.2	10^{-9}

从表 1 实验结果可以看到,晶体端面出射光斑直径为 2.35 mm,和计算结果相同。说明由于半导体激光器参数比较准确,由于自聚焦透镜和调制器内的光程较短,产生的光斑直径的误差很小。为了满足空间光通信的光束质量要求,选择高质量自聚焦透镜和光学发射天线非常重要。从表 2 实验结果可以看到,实际消光比有所降低,和理论计算结果具有 20%左右的误差,主要是由于光学元件实际透射率、有效折射率等参数和理论参数存在一定误差;此外,各光学元件的光路调整精度对消光比也有一定影响。从表 3 实验结果可以看到,本激光调制器的调制频率和功率等主要性能指标很好地满足了 7.37 km 空间光通信需要,并且实现了非常低的通信误码率,该激光调制器能够应用于语音、图像和视频的无线传输系统。

5 结 论

空间光通信中激光调制器可以利用 LN 晶体的线性电光效应开展设计,采用组合调制方式、横向调制方式能够有效地克服自然双折射的影响、降低半波电压、提高调制频率;LN 晶体具有很好的抗光损伤能力,通过提高晶体孔径利用效率、采用高效光路耦合技术等方法,能够实现较大的光功率输出。通过理论分析和静态实验验证,设计的调制器能够实现调制频率 500~1000 MHz,输出光功率大于 1 W 的技术参数。通过动态实验数据计算得到的消光比约为 20 dB,虽然和理论值之间存在一定误差,但不影响调制器应用于链路距离为 7.37 km 的室外光通信演示验证实验中,当调制器分别工作在调制频率 500 MHz,输出功率 500 mW 和调制频率 1000 MHz,输出功率 350 mW 时,均成功地实现了误码率优于 10^{-9} 的光通信。在开展电光晶体掺杂、晶体精密切割、温度控制和电极优化设计等深入研究的基础上^[14],能够进一步提高激光调制器的调制频率和输出功率,以满足更远距离临近空间和深空光通信需要^[15~17]。

参 考 文 献

- Zhang Wentao. Technology and development of free-space laser communication[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2003, **20**(3): 269~272
张文涛. 自由空间光通信技术及国内外发展状况[J]. 量子电子学报, 2003, **20**(3): 269~272
- Xu Guoliang, Zang Xuping, Xu Weihong *et al.*. Free space optical communication[J]. *Optoelectronic Technology*, 2002, **22**(4): 198~205
许国良, 张旭苹, 徐伟弘 等. 自由空间光通信[J]. 光电子技术, 2002, **22**(4): 198~205
- Chen Jianwen, Yao Yafeng, Liu Zili *et al.*. Design and realization for space optical communication system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(9): 14~17
陈建文, 姚亚峰, 刘自力 等. 空间光通信系统的设计及实现[J]. 光电工程, 2004, **31**(9): 14~17
- M. A. Rahman, S. Haxha, S. S. A. Obayya *et al.*. Design issues for high-speed electrooptic modulators[C]. *SPIE*, 2003, **5246**: 287~298
- Zhang Jun, Han Shengyuan, Lu Guiwu *et al.*. Calculation for electronic structure and optical properties of LiNbO₃ crystals

- [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1227~1231
- 张 军, 韩胜元, 卢贵武 等. 铌酸锂晶体电子结构和光学性质计算[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1227~1231
- 6 Zhang Kecong, Wang Ximin. *Nonlinear Optical Crystal Materials*[M]. (1st edn.) Beijing: Science Press, 1996. 46~48, 201~203
- 张克从, 王希敏. *非线性光学晶体材料科学*[M]. 第一版. 北京: 科学出版社, 1996, 46~48, 201~203
- 7 A. Muraro, N. Passaro, M. Abe *et al.*. Design of electrooptic modulators using a multiobjective optimization approach[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(16): 2969~2976
- 8 Hu Jun, Zhang Rongzhu. Effects of temperature on electro-optic phase modulation characteristics of LiNbO₃[J]. *Optic and Electronics*, 2009, **7**(5): 5~8
- 胡 军, 张蓉竹. 温度对铌酸锂电光相位调制特性的影响[J]. *光学与光电技术*, 2009, **7**(5): 5~8
- 9 Zhang Dengwei, Liu Cheng. Influence of axial magnetic field on LiNbO₃ modulator's half-wave voltage[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(12): 123~126
- 张登伟, 刘 承. 轴向磁场对铌酸锂半波电压的影响[J]. *光电工程*, 2006, **33**(12): 123~126
- 10 K. Aoki, A. Ide, J. Kondo *et al.*. Low half-wave voltage X-cut thin LiNbO₃ sheet optical phase modulator with asymmetric coplanar waveguide electrode[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2008, **20**(21): 1811~1813
- 11 Xiao Zhigang, Li Bincheng. Combined multi-mode and single-mode fiber relay for laser beam transportation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 855~859
- 肖志刚, 李斌成. 多模与单模光纤级联系统对激光束的传输[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 855~859
- 12 Gao Yingjun, Yao Shengli, Gao Feng. Optimized coupling of gradient index rod lenses with single mode fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(2): 176~179
- 高应俊, 姚胜利, 高 风. 用自聚焦透镜作平行光束与单模光纤的最佳耦合[J]. *光子学报*, 1999, **28**(2): 176~179
- 13 Zhou Zhen, Cui Fang, Sun Yunan *et al.*. Design of GRIN lens for LD beam collimation and shaping[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(z1): 237~241
- 周 震, 崔 芳, 孙雨南 等. 用于 LD 光束准直整形的 GRIN 透镜的设计[J]. *光子学报*, 2000, **29**(z1): 237~241
- 14 Song Zhe, Liu Liren, Zhou Li *et al.*. Effect of the polarization direction of incident light on electro-optic modulator for light propagating near the optic axis in LiNbO₃[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 319~322
- 宋 哲, 刘立人, 周 煜 等. 入射光偏振方向对 LiNbO₃ 晶体近光轴电光调制的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 319~322
- 15 Liu Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 3~20
- 刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 3~20
- 16 Hamid, Hemmati. *Deep Space Optical Communications*[M]. Wang Ping, Sun Wei. transl. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 68~87
- Hamid, Hemmati. *深空光通信*[M]. 王 平, 孙 威 译. 北京: 清华大学出版社, 2005. 68~87
- 17 Donald E. Maurer, Bradley B. Boone. Conceptual design and algorithm evaluation for a very accurate imaging star tracker for deep-space optical communications[C]. *SPIE*, 2002, **4821**: 237~247