

文章编号: 1001-3806(2015)05-0598-05

基于声光调制的逆向调制光通信系统研究

徐山河, 肖沙里*, 王 珊, 彭帝永

(重庆大学 光电工程学院 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为了扩展自由空间光通信的应用领域, 设计了一套稳定性好、实用性较强的逆向调制光通信系统。采用一种基于声光调制器、逆向光链路等核心元件的实验方法, 利用现场可编程门阵列发出晶体管-晶体管逻辑门电平对声光调制器进行控制, 采用二进制频移键控与二进制脉宽调制调制相结合的四进制调制方法, 同时使用冗余校验置换、改进的汉明码等加密纠错方式, 实现了室内逆向调制激光通信。结果表明, 该通信系统的串口通信速率可达 115.2 kbit/s, 高频载波达 1 MHz, 且保密性良好、误比特率低于 10^{-6} , 同时证明了激光外调制逆向通信系统载波最高可达到 5 MHz 左右。

关键词: 光通信; 逆向调制; 声光调制器; 现场可编程门阵列; 汉明码

中图分类号: TN929.12

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.05.004

Research on modulating retro-reflector technology of laser communication systems based on acousto-optic modulation

XU Shanhe, XIAO Shali, WANG Shan, PENG Diyong

(Key Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems of Ministry of Education, College of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to expand the application fields of free space optical communication, a steady and practical communication system of retro-modulation was designed. Based on acousto-optic modulator (AOM) and the reverse link of light, transistor-transistor logic gate level was send to control AOM by using field programmable gate arrays. By using quaternary modulation method combining binary frequency shift keying and binary pulse width modulation, by using the encryption and error correction methods of redundancy checking replacement and improved Hamming code, reverse modulation laser communication indoor was realized. The results show that serial communication rate of the communication system is 115.2 kbit/s, high frequency carrier is 1 MHz and bit error rate is less than 10^{-6} . Its confidentiality is good. While, it also proves that the maximum carrier wave of laser externally-modulated reverse communication system can reach about 5 MHz.

Key words: optical communication; retro-modulation; acousto-optic modulator; field programmable gate array; Hamming code

引 言

自由空间激光通信系统 (free space optical, FSO), 因其相对于无线电通信具有带宽宽、应用灵活、抗电磁干扰能力强, 且无需获得频率许可证等优势, 近年来逐渐作为无线电通信的替代方式被深入研究^[1]。通过激光内调制, 加以捕获对准跟踪系统 (acquisition, tracking and pointing, APT)^[2]、中继系统^[3]或融入波分复用、多人多出^[4]等技术进行处理后, 基本可满足远距离无线激光通信的要求, 在外太空星际无线传输方面已有较好的发展与应用^[5], 但传统 FSO 链路需两

端都装有发射/接收系统和复杂的跟踪系统, 使得系统的体积、功耗、重量和技术复杂度增加, 成为制约 FSO 应用的重要因素。

逆向调制 (modulating retro-reflector, MRR) 激光通信系统^[6], 可免去通信链路中一个终端的激光收发器和跟踪系统, 从而减轻一方的重量、体积、能耗, 有效解决了 FSO 的应用限制。可将其应用于承载能力弱的终端上, 如热气球、海绵浮标、无人机等; 亦可应用于供电能力弱的终端, 如自供能的野外监测平台、智能机器人等。逆向调制光通信系统为 FSO 通信扩展了应用领域, 提供了轻便、灵活的通信方式。国外对逆向调制通信非常重视, 常选用铁电液晶调制器、微机电系统调制器、多量子阱调制器^[7]、声光调制器 (acousto-optic modulator, AOM) 等调制方法。最早引起瞩目的研究是 1996 年, 美国犹他州州立大学的学者采用铁电液晶

作者简介: 徐山河 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光通信方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xiaoshali@cqu.edu.cn

收稿日期: 2014-07-24; 收到修改稿日期: 2014-08-26

逆向调制器,实现了地面与高空气球间的通信,通信速率达到 20kbit/s;而基于 AOM 的 MRR 系统只有美国约克大学的 SPIROU 等人研究出了通信最高频率为 1MHz 且使用双程声光效应的通信系统^[8]。

本文中选用具有优良温度稳定性和光电特性^[9]的 AOM 作为调制器件,配以高反镜搭建逆向光链路实现了逆向光通信。相较而言,本系统更加灵活,通信范围更加广阔,消除了双程衍射光路的互相干扰;对仪器精度要求更低的同时,通信最高载波却提升到了 5MHz;并且使用改进后的调制、编码、加密算法,使得通信系统的保密纠错能力更强。本系统通信质量好、数据传输稳定,率先在国内开展了声光逆向调制光通信的研究。

1 系统原理与结构概述

本文中基于布喇格声光调制^[10]原理,配以激光发射/接收系统、逆反链路等硬件搭建了 MRR 通信系统平台,该平台主要由 AOM、控制核心现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)、激光器、高反镜、偏振片、滤波片、光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)等组成。其中以 AOM 和 FPGA 开发板作为硬件核心,包括改进后的四进制调制方法、定时采样解调方法、冗余校验(cyclical redundancy check, CRC)加密技术、新型汉明(Hamming)码编码技术等作为关键技术,整个 MRR 通信系统如图 1 所示。

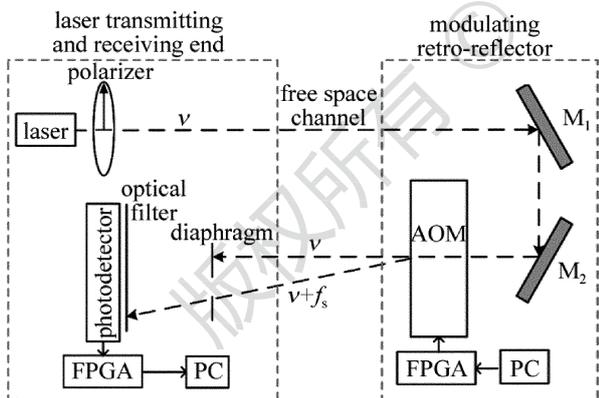


Fig. 1 MRR FSO communication system

图 1 中,激光输出光束(频率为 ν)首先进入偏振片,使得传输过程中的光束为垂直偏振光。激光经过自由空间信道传输到需要反馈信息的终端,由全反镜 M_1 与 M_2 将激光进行逆向偏转,逆反方向可为激光发射端,也可为第 3 方接收站,这样减轻了调制端的系统要求,而且通信链路更加灵活。逆反激光在返回端通过 AOM 进行信息加载,加载了调制信号的反馈 1 级光(频率为 $\nu + f_s$)通过自由空间信道传送到接收端,接收端由 PMT 接收光信号,并经过电路处理和 FPGA 板的

解调,最终还原为调制端所反馈的信息,整个逆向调制光通信过程得以实现。

MRR 逆向通信系统包括光源、AOM、PMT、逆向光路等关键器件,其中 AOM 和逆向光路使用为应用难点。在调制解调等关键算法的处理上则均通过 FPGA 进行实现。

2 MRR 逆向光通信的核心器件及其使用

2.1 声光调制器

AOM 作为关键的调制器件,本系统采用中国电子科技集团第 26 所研制的 TSGMN-1 型声光调制器,该调制器由驱动电源产生的射频信号控制超声波的频率及强度,该 AOM 的超声波中心频率为 100MHz。搭建一个测试平台对 AOM 进行测试,测试平台、测试波形如图 2 所示。

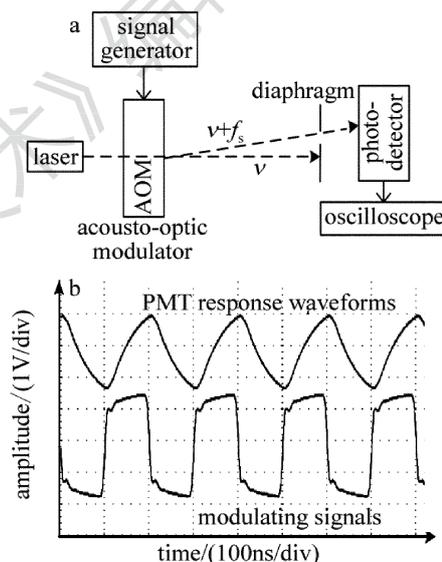


Fig. 2 Test platform of modulation performance of AOM and test result of waveform

a—test platform b—waveform result

测试平台如图 2a 所示,由信号发生器向 AOM 调制端口输入不同频率 TTL 电平,观测 PMT 接收到光信号。测试结果表明,向 AOM 输入频率低于 5MHz 的电平信号,PMT 均能接收到与调制频率一致的光信号,频率高于 5MHz 则严重紊乱。图 2b 所示为调制频 5MHz 时,PMT 接收光信号与调制信号对比的波形图,验证了 AOM 调制加载方式及通信上限频率。

2.2 逆向光链路

光学逆向链路是整个 MRR 的核心光学系统,也是与 FSO 的最大区别。逆向通信常采用“猫眼”反射结构^[11]或角棱镜反射结构^[12]作为逆向器件,而本文中采用高反镜的组合结构实现光学逆反效果,不仅组建更加灵活、精度要求更低,而且通信终端的范围选择更加阔。

根据反射原理组建光学链路如图3所示,其中图3a、图3b为原理图,图3c、图3d为对应实物图。图3a所示为逆向光通信常规链路,发射/接收系统在A处,而逆向调制链路处于B处,高反镜的作用类似于角锥棱镜,将A处的激光返回到A处,并通过AOM将B处的信息传到A处,达到逆向调制通信的效果。相比于角锥棱镜或者“猫眼”结构,高反镜的优势则在图3b中得到体现,高反镜组合光路变换更加灵活,除了逆向返回,还可以将光路反射到第3方终端C处,且C处的位置选择基本可覆盖全局,达到全局范围内的无死角三方通信。该逆反系统将入射光与逆向光链路分开,光线无重叠,消除了二者之间的干涉,使得自身干扰更小,通信效果更好。

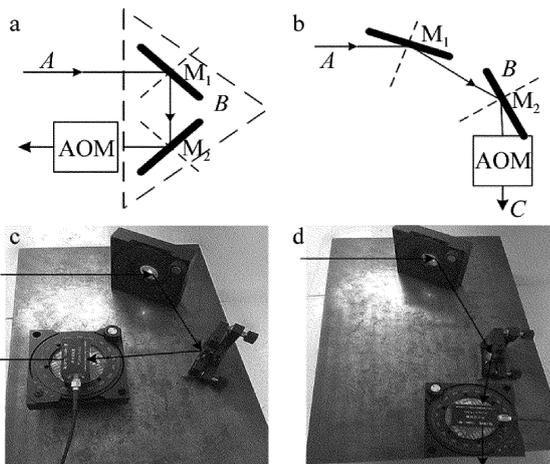


Fig. 3 Optical principle diagrams of the reserve links and photos a,b—principle diagrams of the optical c,d—corresponding photo

3 MRR 逆向光通信的核心算法

3.1 调制解调算法的实现

光通信中常用开关键控 (on-off keying, OOK) 调制、脉冲位置调制 (pulse position modulation, PPM)、频移键控 (frequency-shift keying, FSK) 调制、脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 等调制方法。FSK 具有抗干扰能力强、易于实现等优点, PWM 则是一种最节省频带的调制方法, 将二者的有效结合可使调制系统即节省频带又具有较强的抗干扰能力。FSK + PWM 四进制调制方式便具有此特征, 相比于 2FSK, 其具有

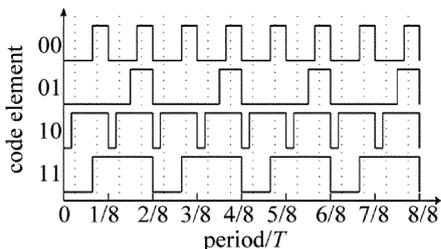


Fig. 4 Principle diagram of modulation and demodulation

带宽窄的优点, 与 4FSK 相比则频带的利用率更高, 以下具体介绍该四进制调制解调方式, 原理如图 4 所示。

如图 4 所示, 为一个码元周期 T 内的四进制码元波形。采用了高低频率和 2 种不同的脉宽分别表示 4 种数字信号。使用串口助手, 向 FPGA 发送波特率为 B_{aud} 的串口信号, 经 FPGA 调制, 将其表示为四进制数据, FPGA 调制原理如下:

$$S_{FPGA} = \begin{cases} g(t_{00}), (\text{send } 00) \\ g(t_{01}), (\text{send } 01) \\ g(t_{10}), (\text{send } 10) \\ g(t_{11}), (\text{send } 11) \end{cases} \quad (1)$$

用 8 个占空比为 30% 或 80%、频率为 $8B_{aud}$ 的矩形波信号分别表示发送信号 00, 10; 用 4 个占空比为 25% 或 80%、频率为 $4B_{aud}$ 的矩形波信号分别表示发送信号 01, 11。

针对于 FSK + PWM 四进制调制方法, 定时采样是一种简单可行的检波解调方法。如图 4 中所示, 纵向虚线为周期内定时采样的位置, 每 $T/8$ 内采样的位置固定为其 25% 和 75% 处。周期内采样后为 16 位二进制数组 $d[15:0]$, 由 $d[15:0]$ 解调出原四进制信号 $s[1:0]$, 其解调对应如下式所示:

$$s[1:0] = \begin{cases} 00, d[15:0] = 1111, 1111, 1111, 1111 \\ 01, d[15:0] = 1010, 1010, 1010, 1010 \\ 10, d[15:0] = 1000, 1000, 1000, 1000 \\ 11, d[15:0] = 1110, 1110, 1110, 1110 \end{cases} \quad (2)$$

PMT 接收到的信号, 经处理后, FPGA 根据 (2) 式采样解调出四进制原始数字信号, 再由并串转换模块输出串口信号, 还原到串口, 实现串口信号的调制解调。

3.2 加密纠错算法的实现

信号在信道传输过程中会受到随机信号、突发信号等信号的干扰, 且信道暴露在外, 安全隐患严重, 为降低误比特率、提高通信质量、保障通信安全, 本通信系统中使用了加密纠错算法, 使得系统更加完善。加密纠错算法编码顺序如图 5 所示。

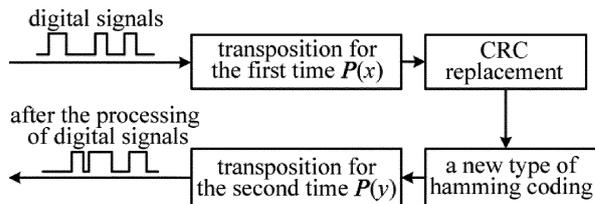


Fig. 5 Sequence diagram of encryption and error correction coding

如图 5 所示, 本文中采用加密与纠错交替使用的方式。加密采用了多次换位加密与循环冗余检验 (cyclic redundancy check, CRC) 置换加密结合的方式, 纠错码则

采用了 Hamming 码与奇偶校验码相结合的方式。其中 CRC 置换加密具体算法如下:(1)生成多项式 $G(x) = x^8 + x^5 + x^3 + 1$, 对应除数则为 [100101001];(2)将 8 位原信息左移 8 位,右 8 位由 0 补充,得到 16 位数据;(3)用 16 位数据模二除以 [100101001], 计算得到 8 位余数,即

$$\begin{cases} P(x) = \begin{bmatrix} 8 & 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \\ 6 & -4 & 5 & 2 & -8 & 1 & -3 & 7 \end{bmatrix} \\ P(y) = \begin{bmatrix} 14 & 13 & 12 & 11 & 10 & 9 & 8 & 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \\ 6 & 9 & 13 & 11 & 7 & 12 & 14 & 3 & 5 & 10 & 4 & 2 & 8 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

对于授权者,加密后的信息解密相对容易,可利用 CRC 查找表、换位逆矩阵等方式进行破译;而非授权者破译相对困难,盲目解密,则每 8 位数字信号需 2^{13} 次尝试方可破译,且无规律可循,增加了破译的难度,增强了数据的安全性。

本文中采用的汉明码与奇偶校验码相结合编码是一种改进的汉明码编码方式,其能有效地降低误比特率,提高通信质量。改进的汉明码位图如表 1 所示。原信号为 8 位二进制信号 $B[8:1]$, $P[4:1]$ 为生成的汉明码, $C[2:1]$ 为偶校验码。

Table 1 Bitmap of the improved hamming coding

B_8	B_7	B_6	B_5	B_4	P_4	B_3	B_2	B_1	P_3	C_2	P_2	P_1	C_1
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

编码算法如下式所示,首先由 8 位数据信号异或运算生成信息位偶校验码 C_2 ,再根据汉明编码方法,由 $B[8:1]$ 、 C_2 生成汉明码 $P[4:1]$,最后由 $P[4:1]$ 通过异或运算生成汉明码编码部分偶校验位 C_1 。

$$\begin{cases} P_4 = B_8 \oplus B_7 \oplus B_6 \oplus B_5 \oplus B_4 \\ P_3 = B_8 \oplus B_7 \oplus B_3 \oplus B_2 \oplus B_1 \\ P_2 = B_6 \oplus B_5 \oplus B_3 \oplus B_2 \oplus C_2 \\ P_1 = B_8 \oplus B_6 \oplus B_4 \oplus B_3 \oplus B_1 \oplus C_2 \\ C_2 = B_8 \oplus B_7 \oplus B_6 \oplus B_5 \oplus B_4 \oplus B_3 \oplus B_2 \oplus B_1 \\ C_1 = P_4 \oplus P_3 \oplus P_2 \oplus P_1 \end{cases} \quad (4)$$

该编码方式中,将原始信息与编码部分使用不同的偶校验位 C_2 和 C_1 进行分别跟踪。相比于扩展型汉明码,该编码能获得误码的分布情况,从而纠错检错能力更强。不仅可纠正一个任意位置错误,而且当判断信息位无错,编码位出错,则无论其有 1 个或多个错误,均能将正确的信息位提取并正确传送。

4 实验结果与分析

基于上述关键器件及关键算法搭建了基于 AOM 的逆向调制激光通信系统实验平台,通信系统的基本原理如图 1 所示。发射端与接收端处于同一终端,调制端则处于通信的另一终端,如此扩展了 FSO 通信的

为置换后的信息。

加密算法中的换位加密主要利用换位矩阵,设计中初始 8 位信息和经过编码后的 14 位编码信息采用不同的换位矩阵 $P(x)$, $P(y)$ 实现换位效果,换位矩阵为私钥,可任意设定,本文中设定换位矩阵如下式所示:

应用场合,使得通信更加灵活。在搭建好的通信平台上,通过 PC 串口发送不同数据,将 8 位信息位送入 FPGA,对其进行 FSK + PWM 四进制调制、改进的汉明码编码、CRC 加密及换位加密等算法处理,处理后的信号从 AOM 调制端输入,使其对经过 AOM 的激光进行准确的控制。实验中采用 637nm 全固态连续激光器作为通信光源,激光通过无线信道传输,经逆向调制端的 AOM 进行信号调制;接收端则采用 PMT 进行光信号探测,经电路处理后的电信号,即可送入示波器进行实时观察,也可送入 FPGA 开发板进行运算处理;FPGA 对信号进行解调、解码、解密等算法处理后,输出信号由串口返回到 PC,观察实验解调数据,对比发送数据,计算误比特率。

实验中选择数字信号“45”为传送内容,如图 6a 所示,串口首先输出为“010001010”,其中最低位为起始标志位 0;数据经过一次换位及 CRC 置换加密得到信息为“10011111”(见图 6b);使用改进的 Hamming 码进行编码得编码后信息为“10011111100100”(见图 6c);对 14 位编码信息进行二次换位得到加密信息为“11011011010010”(见图 6d);数字加密信号使用 FSK + PWM 四进制调制,得到最终控制 AOM 的调制信号,如图 6e 所示。

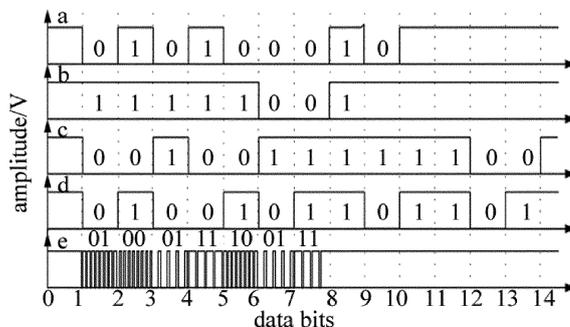


Fig. 6 Process of signal modulation

在信号接收端, PMT 接收的光信号经电路处理后,在示波器上显示的信号与调制信号一致。该信号经 FPGA 处理后返回到另一台 PC 机,可正确解调出原始信号“45”,实现了数字光通信。

在实验室内,下午和晚上分别以不同码率发送不

同数字信号,每个码率连续发送时间超过 0.5h,统计超过 10^7 bit 信号的接收,与发送数据对比求得误比特率,如表 2 所示。

Table 2 Experiment result of bit error rate

time	bit error rate at 9.6kbit/s	bit error rate at 19.2kbit/s	bit error rate at 115.2bit/s
daytime	$<10^{-8}$	$<10^{-8}$	$<10^{-6}$
night	$<10^{-8}$	$<10^{-8}$	$<10^{-6}$

实验结果表明,无论白天或夜晚,在解调端均能正确解调出原始信号,这主要得益于添加滤光片的原因,使得该系统基本不受室内的干扰光线影响。因此,室内搭建的逆向调制激光通信平台成功达到了预期目标,实现了室内 5m 内串口数据的正确发送与接收,通信速率达 115.2kbit/s。经统计,不同码率传输下误比特率均低于 10^{-6} ,实现了数据的正确传输。

分析整个系统,由于研究中采用串口作为数据传输方式,本系统的上限通信速率受到串口最大通信速率 115.2kbit/s 的限制,高频载波为八倍频,达 1MHz;若改用其它端口作为数据传输方式,则通信速率会有很大提升,最高可达器件性能上限如图 2a 所示的 5MHz。以后工作将会以提高通信质量和通信速率为重心,主要是提高 AOM 的超声波中心频带,优化接收端电路的设计,改进调制解调算法等方面;进行传输方式的改进,让通信速率不再受到串口协议的限制,并以逆向调制为基础进行双工光通信的探索研究。

5 小 结

设计了一套基于 AOM 的逆向调制光通信系统,采用改进后的调制、编码加密等算法,加入逆向光链路,实现了室内通信速率为 115.2kbit/s、误比特率低于 10^{-6} 的数字逆向光通信。本系统设计采用数字化方法,以 FPGA 为控制核心,将状态控制、串口传输、调制编码加密算法集为一体,降低了通信器件的复杂度,

增强了系统的稳定性。实验证明,在室内进行的逆向调制光通信,达到了预期目标,通信质量良好、数据传输稳定。

参 考 文 献

- [1] HENNIGER H, WILFERT O. An introduction to free-space optical communications[J]. Radio Engineering, 2010, 19(2):203-211.
- [2] PING W, JUN K, FEN W, et al. Compressive imaging based target locating system for APT in FSO communication[J]. Proceedings of the SPIE, 2012, 8558:855807.
- [3] KARIMI M, NASIRI-KENARI M. Free space optical communications via optical amplify-and-forward relaying [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(2):242-248.
- [4] LETZEPIS N, GUILLEN I FABREGAS A. Outage probability of the Gaussian MIMO free-space optical channel with PPM [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(12):3682-3690.
- [5] BEGLEY D L. Free-space laser communications: a historical perspective[J]. IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2002, 2:391-392.
- [6] GOETZ P G, RABINOVICH W S, MAHON R, et al. Modulating retro-reflector lasercom system at the naval research laboratory [C]//2010 Military Communication Conference. New York, USA: IEEE, 2010:1601-1606.
- [7] RABINOVICH W S, GOETZ P G, WALUSCHKA E, et al. A cat's eye multiple quantum-well modulating retro-reflector[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(3):461-463.
- [8] SPIROU G, YAVIN I, WELL M, et al. A high-speed-modulated retro-reflector for lasers using an communication system [J]. Canadian Journal of Physics, 2003, 81(4):625-638.
- [9] GUNAWARDENA M, PAUL W H, JARED S, et al. A frequency stabilization technique for diode lasers based on frequency-shifted beams from an acousto-optic modulator[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(10):103110.
- [10] YAO J Q. Optoelectronic technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:296-300 (in Chinese).
- [11] GOETZ P G, RABINOVICH W S, BINARI S C, et al. High-performance chirped electrode design for cat's eye retro-reflector modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(21):2278-2280.
- [12] HE J Y, TAO Z H, YU X, et al. Discuss performance of corner-cube prism for modulating retro-reflector terminal in free-space laser communication [C]//2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO). New York, USA: IEEE, 2012:1-3.