

文章编号:1672-058X(2012)09-0051-06

# 基于声光效应的无线激光 DQPSK 调制\*

霍 畅,肖沙里,王兆浪

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400030)

**摘 要:**由于光器件的发展,改进常规光无线信息交换系统,实现高速率的光无线通信研究得到了越来越多的关注;设计了一套基于声光效应的无线激光 DQPSK 调制系统,搭建了预编码电路,利用声光调制器进行实验方案验证,测试了码元速率 2 Mbit/s 下调制信号的动态特性,对其进行了频谱分析;结果表明:在高码元速率下,该设计系统信噪比高,可应用于需要高的传输速率和高可靠性的无线激光通信系统中。

**关键词:** DQPSK;声光效应;信噪比

**中图分类号:** TN71

**文献标志码:** A

激光无线通信可以用于很多特殊的场合,特别是高温、高压、强磁等不利于有线、红外或普通无线电波通信的场合。如果加上瞄准装置,还可以在战场、灾区迅速搭建通信平台,发挥远距离通信作用,有较高工程应用价值<sup>[1,2]</sup>。由于光学器件的发展,改进常规的光无线信息交换系统,实现高速率的光无线通信,这方面的研究吸引着越来越多的关注<sup>[3]</sup>。无线光通信一般为强度调制/直接检测(Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD)系统<sup>[4]</sup>。声光 DQPSK 调制(Differential Quadrature Phase Shift Keying, 差分正交相移键控调制)是基于声光效应的四相相位调制方式,利用该效应可将相位信息转化为幅度信息,其信号强度上近似恒定常数的包络,对非线性效应有良好的抗御力<sup>[9]</sup>。在相同的码元速率情况下,DQPSK 的系统容量是 BPSK 的两倍,因此能带利用率更高。与传统的二进制振幅键控(OOK)调制方式相比,DQPSK 具有抗非线性抵抗力,可以改善光传输系统信噪比,达到更高的传输速率。此外,DQPSK 采用差分相对相移,依靠前后两个接收码元信号的相位差来恢复信号,能有效地避免相位模糊的问题<sup>[4]</sup>。

## 1 基本原理

自由空间声光 DQPSK 调制的实现,需要预编码电路和线性声光调制器(AOM),系统结构框图如图 1。预编码电路以 FPGA 为关键核心器件进行搭建,以避免重复解码、差错传输及降低硬件的复杂度。线性声光调制器通过设置适当工作点,使得一级衍射光强被外加电压的信号线性调制。编码电路输出电压作为 AOM 控制信号来调制激光束。

### 1.1 预编码电路

在声光 DQPSK 预编码电路中每次可传输 2 个信息比特,这些信息比特是通过载波的 4 种相位来传递。

收稿日期:2012-01-17;修回日期:2012-02-25.

\* 基金项目:重庆大学中央高校基本科研业务费研究生个人创新项目个人资助项目(CDJXS11120008).

作者简介:霍畅(1986-),男,四川绵阳人,硕士研究生,从事无线光通信方面的研究.

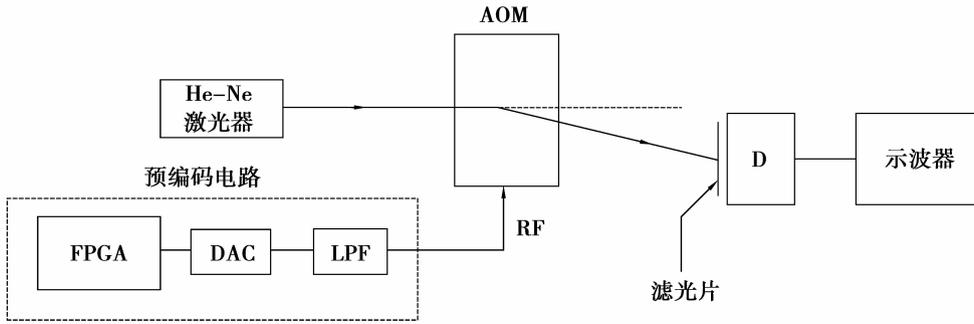


图 1 调制系统框图

先经串/并转换电路将串行的二进制序列中每相邻两个比特分成一组,共有 4 种组合,即 00、01、10、11,其中每一组称为双比特码元。4 种载波相位分别为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ ,以双比特码元速率规定的逻辑关系对载波进行调相。自然码 DQPSK 调制中,双比特与载波相位逻辑变化存在以下关系:

$$\begin{aligned} x'_i &= x_i \oplus x'_{i-1} \oplus [y_i y'_{i-1}] \\ y'_i &= y_i \oplus y'_{i-1} \\ \Delta\Phi &= \Phi_i - \Phi_{i-1} \end{aligned}$$

其中,  $X_i, Y_i$  为绝对码的第  $i$  个四进制码元对应的双比特;  $X'_i, Y'_i$  为相对码第  $i$  个四进制码元所对应的双比特,相位为  $\Phi_i$ ;  $X'_{i-1}, Y'_{i-1}$  为相对码第  $i-1$  个四进制码元对应的双比特,相位为  $\Phi_{i-1}$ 。

## 1.2 声光调制

声光调制是利用声光效应将信息加载于光频载波上的一种物理过程。调制信号是以电信号(调幅)形式作用于电声换能器上而转化为与电信号频率变化相同的超声波场。由于声光作用,光束通过介质时发生相互作用而改变光的传播方向即产生衍射,从而使光载波受到调制而成为“携带”信息的强度调制波。

一级衍射光强  $I_1$  和加在声光介质盒上的电压振幅  $U_m$  有如下的关系:

$$I_1 = I_i \sin^2(\alpha' U_m) \quad (1)$$

式(1)中  $I_i$  是入射光强,  $\alpha'$  是和调制器结构有关的常数<sup>[5]</sup>。

因为使用了线性调制器,调制器高频电压振幅  $U_m$  和调制器上控制电压  $U$  有如下关系:

$$U_m = \beta u \quad (2)$$

式(2)中  $\beta$  是比例常数。

把式(2)代入式(1)中,得到:

$$I_1 = I_i \sin^2(\alpha u) \quad (3)$$

式(3)中  $\alpha = \alpha'\beta$ , 与结构有关的常数<sup>[5]</sup>, 式(2)形成了调制曲线见图 2。

$$\frac{d^2 I_1}{du^2} = 2\alpha^2 I_i \sin(2\alpha u) \quad (4)$$

令  $\frac{d^2 I_1}{du^2} = 0$ , 就有  $u = u_0 = \frac{\pi}{4\alpha}$ ,  $\frac{dI_1}{du_m}$  在  $u = u_0$  两侧有不同的符号,因此该点就是曲线的拐点,见图 3。

在拐点附近的一段可看成直线,可用它来调制 He-Ne 激光强度。为了减少失真须使偏压设在拐点  $u = u_0$  上,或者说工作点设在拐点上。

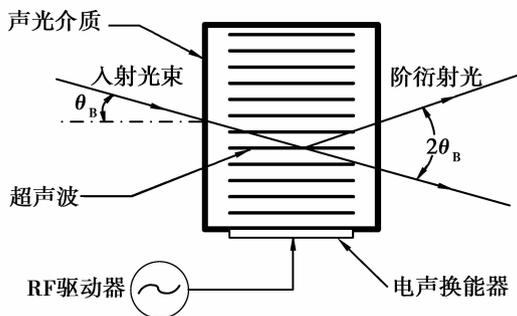
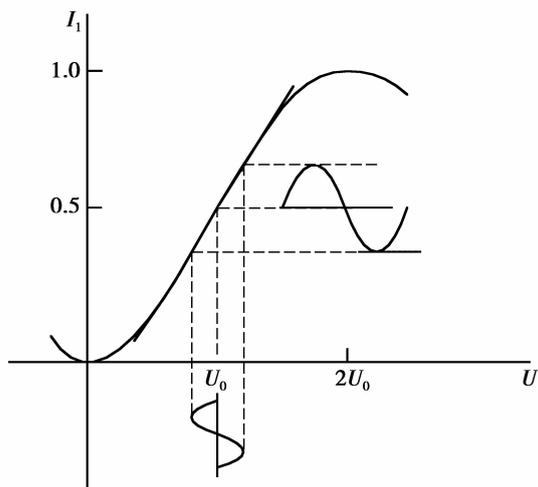


图2 声光布拉格调制原理图

图3 在工作点设在拐点上输入  
信号较小时的线性调制

## 2 声光 DQPSK 调制实现

声光 DQPSK 调制实验原型采用以 FPGA 为核心的预编码电路输出控制信号,通过声光调制器对 He - Ne 激光器光束进行强度调制。系统使用的光信号接收器件是光电倍增管(PMT),其具有灵敏度高、响应速度快、稳定性好等优点。实验所使用 PMT 上升时间为 2.2 ns,光谱响应范围为 185 ~ 650 nm,典型增益为  $7.5 \times 10^6$ 。数据采集使用新一代 Agilent Infinium 系列示波器,采样率为 2 Gsa/s,响应截止频率 100 MHz,输入电阻、电容分别为 10 M $\Omega$  和 14 pf。

### 2.1 预编码电路实现

FPGA 进行 DQPSK 数字预编码后,使用 DAC 转换为模拟信号,再经过低通滤波得到电压信号完成原始数据流编码,就可作为声光调制控制输入。

Altera 公司 Cyclone II EP2C35 系列低成本 FPGA 具有丰富的 LE、ROM、DSP 等资源,可以很好满足数字预编码设计。至顶向下使用 Verilog HDL 语言设计各功能模块,数字编码电路主要由以下几部分组成:信号源、串并转换模块、差分编码映射模块、四相载波发生器和正交调制模块,顶层电路模块图如图 4 所示。

主要模块功能说明如下:

对于四相相移键控,在接收端载波恢复时可能恢复出的载波与发送端使用的载波频率相同而相位相差  $\pi/2$  的 0、1、2、3 倍,称之为四重相位模糊,并会导致解调得到的数字信号错误。解决该问题的有效方法是采用相对相移 QPSK,即对发送的两路二进制数字信号进行差分编码,使编码后的二进制信号不仅和本时刻编码的信号有关,而且还和前一时刻编码的信号有关。这时发送的不再是信号的绝对值,而是前后两时刻的相对关系。

四相载波发生器主要产生四种频率相同、相位互差  $\pi/2$  的载波信号。模块采用数控振荡器 NCO 来实现。NCO 由相位累加器、波形 ROM 查找表组成。相位累加器的作用是将数字本振频率转换成相位,每来一个时钟脉冲,相位在原来的基础上增加一个相位增量。正余弦表存储器将  $0 \sim 2\pi$  相位的正弦和余弦值用二进制存储起来,相位累加器的输出作为地址来查表。通过改变输入的相位偏移,达到改变正弦和余弦载波的输出频率的目的。

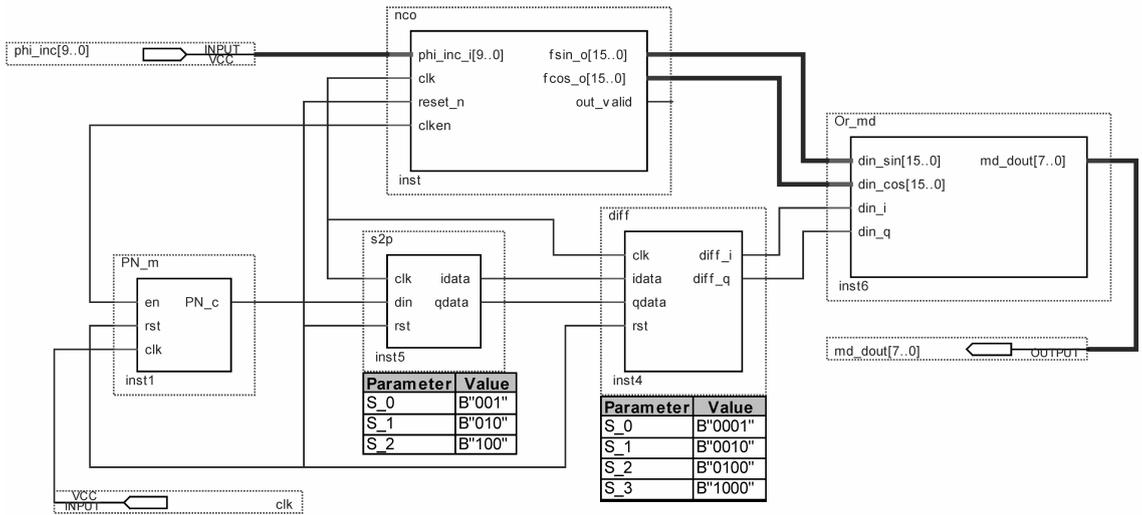


图 4 DQPSK 数字预编码顶层模块图

根据要处理信号比特率,精度和价格等因素,选取了 DAC908 用作数模转换芯片。DAC908 是属于  $T_x$  DAC 系列的一款芯片,该系列针对通信系统的传输进行了优化,本芯片并行输入为 8 比特数字信号,转换频率可达 165 MSPS。低通滤波电路采用 Sallen-Key (S-K) 滤波电路,结构简单,并且在滤波电路中引入反馈,使输出电压在高频段迅速下降,从而有效改善滤波特性。

## 2.2 声光调制

实验所使用声光调制器工作介质为钼酸铅 ( $PbMoO_4$ ) 晶体,折射率为 2.3,电声换能器为铌酸锂 ( $LiNbO_3$ )。AOM 工作频率也即超声波的频率为 100 MHz,工作波长为 632.8 nm,允许光束最大束腰直径为 1.5 mm,超声波波长为 36.32  $\mu$ m,计算得布拉格角为 3.79 mrad。

## 3 实验结果及分析

实验所使用激光光源为氦氖激光器,波长 632.8 nm,其功率为 1.5 mw,束腰处光斑大小为 1 mm。测试码元速率 2 Mbit/s,根据四相相位调制原理,正余弦载波频率设置为 8 MHz。只设置满足需要而不过高的载波频率,达到降低系统要求,减少成本目的。PMT 接收调制光信号,其读出电路中含有滤波部分,以减小高频增益。示波器采集数据的采样率为 500 Msa/s,采样点数 1 000 个。发送源信号和 PMT 读出滤波后信号如图 5 所示。

通过时域分析可以看出,所得波形并非规则正余弦波形,出现一定程度的畸变。这是由于声光调制器工作点偏压与输入信号电压叠加后的控制电压幅度稍大,从而超出声光调制曲线线性区间,产生高次谐波,引起非线性失真程度过大。这就需要在声光调制器驱动电源模块引入线性补偿电路,或是对预编码电路输出电压进行适当限幅。但不同码元之间,仍然相位跳变分明。并且,由于四相相位调制中存在对原始码元串并转换环节,码元速率降低一半,使得正余弦载波相位跳变频率也降低一半,这也说明所得波形即是成功调制后的信号波形图。

对得到的信号进行傅里叶变换得到的频谱如图 6 所示。接收到的信号能量中心频率与载波频率一致,旁瓣小,能量分布集中。虽调制信号接收电路具有高频增益抑制功能,已调信号中仍出现了以输入载波信号 3 倍频和 5 倍频为主的噪声干扰。这是调制器工作点设置在拐点上,但是输入信号较强造成的,可以由式 (2) 推导。

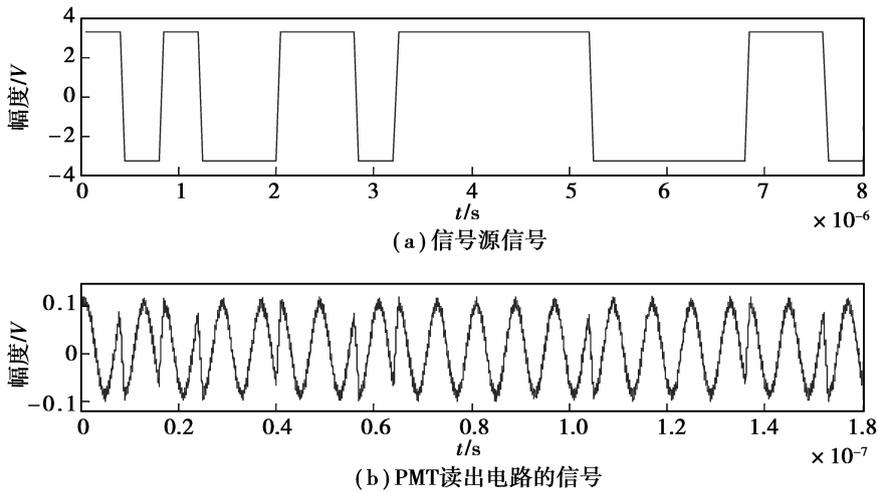


图5 调制系统信号波形图

谱线

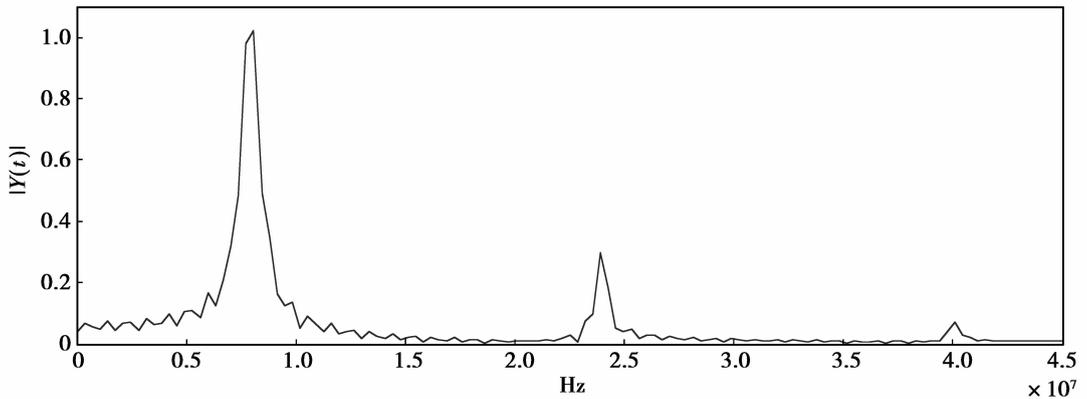


图6 读出信号的频谱图

在声光强度调制中,拐点被选为工作点,从式(3)得到  $\alpha u_0 = 1/4\pi$ 。一级衍射光强:

$$I_1 = I_i \sin^2(\alpha u) = \frac{1}{2} I_i [1 + \sin 2(\alpha U \sin \omega t)] \tag{5}$$

如果输入信号较小,也就是  $U \ll U_0$

$$I_1 \cong \frac{1}{2} I_i [1 + 2\alpha U \sin \omega t]$$

$I_1$  和  $U \sin \omega t$  是成线性关系的。在这一过程中一级衍射光强被外加信号线性调制。

工作点仍然在拐点上,但是输入信号较强,可以把式(5)展开:

$$I_1 \cong I_i \left( 1 + 2\alpha U \sin \omega t + \frac{4}{3} \alpha U (\sin \omega t)^3 + \frac{4}{15} \alpha U (\sin \omega t)^5 + \dots \right)$$

三角变换:

$$I_1 \cong I_i \left( 1 + \frac{7}{6} \alpha U \sin \omega t + \frac{1}{4} \alpha U \sin 3\omega t + \frac{1}{60} \alpha U \sin 5\omega t + \dots \right)$$

那么在输出的调制光束中就有奇次谐波分量,其中更高次谐波分量较小可忽略。但噪声能量相对小,系统仍有高的信噪比。解决此问题的办法是对作为调制器控制输入信号的预编码输出电压进行一定分压限幅,使其位于调制曲线的线性区,从而进一步提高系统信噪比,该方案便可应用于需要高速度和高可靠性

的无线激光通信系统中。

## 4 结 论

以先进的 FPGA 技术为核心搭建预编码电路,利用声光调制器进行了对氦氛激光束的 DQPSK 调制实验测试,采集了动态实验数据,分析了系统性能和噪声来源,理论分析和实验结果一致,验证该方案在高码元速率下仍具有高的信噪比。本系统结构简单、灵活,可移植性好,可作为高速率无线激光通信中行之有效的调制方式。

### 参考文献:

- [1] 程刚,王红星,孙晓明,等.一种新型的无线光通信调制方法[J].中国激光,2008,35(12):1914-1918
- [2] 程刚,王红星,吴龙刚,等.大气无线光通信调制方式性能分析[J].中国电子科学研究院学报,2007,2(5):485-489
- [3] MARINOS D,AIDINIS C,SCHMITT N,et al. Wireless optical OFDM implementation for aircraft cabin communication links[C]. ISWPC,2010,465-470
- [4] 殷喉菡,焦日里,陈燕燕,等. DQPSK 在高速传输中三种调制码型的研究[J]. 华东交通大学学报,2010,27(1):36-41
- [5] 衣汉威,陈赤晶,赖恒山,等. 声光强度调制和失真波形分析[J]. 长春理工大学学报,2004,27(2):6-9
- [6] 袁天夫. 四相相移相对键控(QPSK)差分译码器的实现[J]. 数字通信,1996(1):44-47
- [7] 曾尚璠,沈华,俞振利. 基于 Matlab 系统信号 FFT 频谱分析与显示[J]. 科技通报,2000,16(4):241-246
- [8] 李佳,唐垒,宫兵,等. 一种基于数据辅助的 PSK 信噪比估计新方法[J]. 军事通信技术,2011,32(2):57-60
- [9] 范永辉,王呈贵,龚玉萍. DQPSK 直扩调制解调器的 FPGA 实现[J]. 军事通信技术,2003,24(4):43-46
- [10] 丁毅,王林,王鹏,等. 炮口初速测量技术[J]. 四川兵工学报,2011,32(3):35-40

## Wireless Laser DQPSK Modulation Based on Acoustic-optic Effect

**HUO Chang, XIAO Sha-li, WANG Zhao-lang**

(Key Laboratory of Optoelectrical Technology and System of Ministry of Education,  
Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The state of development of optical devices has led to increased interest in high data rate wireless optical communication schemes that constitute a viable alternative to conventional wireless technologies for information exchange. In this paper, a DQPSK modulation system, based on acoustic-optic effect, has been designed for wireless laser communication, a precoding circuit has been arranged, the modulation scheme was implemented and demonstrated with a acoustic-optic modulator, the transient data and spectrum of the modulated light signal was tested and investigated at a data rate of 2Mbit/s and the outcome shows that the modulation system has a high SNR at a high data rate. The deigned scheme was quite suitable for wireless laser communication system which needs high operation frequency and reliability.

**Key words:** DQPSK; acoustic-optic effect; SNR