

基于 256 级灰度线性声光调制器驱动电源的设计

蔡睿博¹, 张志伟^{1,2}, 周 森¹

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘 要:该文设计了一种衍射光功率随灰度等级呈线性变化的 256 级线性声光调制驱动源。该设计通过使用单片机对以数字电位器 DS3902 为核心的数字电压控制电路, 在声光调制器输入电压 0~5 V 内产生了具有 256 个档次的数字电压, 并对声光调制器的性能进行了研究。根据声光器件固有的非线性特性, 通过线性补偿技术, 使补偿后衍射光功率与灰度等级的线性相关系数可达 99.91%, 比补偿前提高了 1.15%。

关键词:衍射光强; 驱动电源; 声光调制; 振幅调制; 数字电位器

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2019.06.023

Design of Linear Acousto-optic Modulator Driving Power Supply Based on 256 Level Gray Scale

CAI Ruibo¹, ZHANG Zhiwei^{1,2}, ZHOU Sen¹

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In this paper, a 256-level linear acousto-optic modulation driving source with diffracted optical power linearly varying with gray level is designed. The design uses a digital voltage control circuit with a digital potentiometer DS3902 as the core to generate a digital voltage with 256 levels in the input voltage of the acousto-optic modulator from 0 to 5 V, and the performance of the acousto-optic modulator is investigated. According to the inherent nonlinear characteristics of the acousto-optic device, the linear correlation coefficient between the compensated diffracted optical power and the gray level can reach 99.91%, which is 1.15% higher than that before compensation.

Key words: diffraction intensity; driving power; acousto-optic modulation; amplitude modulation; digital potentiometer

0 引言

基于布喇格衍射效应的多灰度线性声光调制器(AOM)在激光大屏幕图文显示、激光外差干涉技术和其他高精度测量等领域发挥了重要的作用。如在基于光外差干涉技术检测微弱超声振动的实验中, 利用布喇格效应的声光调制器产生频率不同的两束光, 可通过调节具有 256 级数字调控电压的线性声光调制器来控制两束光, 使其获得合适的强度, 进而实现良好的检测效果。由激光器、声光器件和驱动源组成的声光调制系统, 可有效地测试声光调制器的性能。本实验中, 使用双路、非易失、256 级及低温系数的数字可变电阻器 DS3902 为主的恒流源

电路, 将 0~5 V 分为 256 级的输入电压, 作用于声光调制的驱动电源, 可改变通过声光调制器的一级衍射光的光强^[1-2]。

1 声光调制系统总体设计

1.1 声光调制原理

经由电声换能器产生的超声波作用于声光晶体时, 将使声光晶体的光学性质(折射率)发生周期性的变化, 成为等效于超声波波长的光栅, 当激光以布喇格角 θ_B 入射到声光晶体时, 将发生布喇格衍射, 产生的衍射光路^[3-5]如图 1 所示。图中, I_i 为入射光强, \mathbf{k}_s 为超声波波矢。布喇格衍射的工作方式具有衍射光强分布不对称的特点, 只有 0 级和 +1 级

收稿日期: 2019-04-15

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(201701D121060)

作者简介: 蔡睿博(1995-), 男, 山西临汾人, 硕士生, 主要从事光外差干涉测量技术的研究。通信作者: 张志伟(1964-), 教授, 博士, 主要从事光电探测理论与技术方面的研究。

(或 -1 级)衍射光,且可通过改变输入电压的方式调节在 0 级和 +1 级(或 -1 级)衍射光上的入射光能量。由光的电磁理论可以证明,对于频率为 ω 的入射光,以 θ_B 入射到经频率为 Ω 的超声波作用的声光晶体时,其布喇格衍射的 +1 级(或 -1 级)衍射光的频率为 $\omega + \Omega$ (或 $\omega - \Omega$)。相应的 0 级和 +1 级衍射光强分别为

$$I_0 = I_i \cos^2 \frac{\varphi}{2} \quad (1)$$

$$I_1 = I_i \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad (2)$$

式中 φ 为光通过声光介质后,由折射率变化引起的附加相移。当控制入射超声功率来改变 φ 时,就可达到控制 0 级与 +1 级衍射光功率的目的。

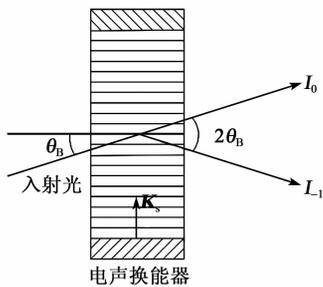


图 1 布喇格声光衍射

1.2 声光调制系统

基于声光效应原理设计搭建的声光调制系统,主要部分由激光器、声光调制器件、驱动源及光功率计组成,结构框图如图 2 所示。其中受微机和单片机控制的驱动源可改变对声光调制器件的输入功率达到多灰度声光调制的目的。当激光束以 θ_B 入射到声光调制器时,就会发生布喇格衍射,产生两束光功率互补的衍射光,当通过数字电压控制电路给驱动源输入线性电压时,就会使两束衍射光的光功率发生一定规律变化^[6]。使用以数字电位器 DS3902 为主的恒流源电路,可在输入电压 0~5 V 的变化范围内,得到 256 个线性变化的电压以及与其相对应的光功率,并通过对声光器件性能的理论分析验证了实际测量数据的可靠性,之后利用经过处理的测量结果选择一个合适的数字电压控制电路,就可实现 256 级灰度的线性声光调制器的设计。在数字电压控制电路原有功能的基础上添加灰度等级的选择与显示功能,使多灰度线性声光调制器在大屏幕显示与在光外差干涉系统中更易得到应用。

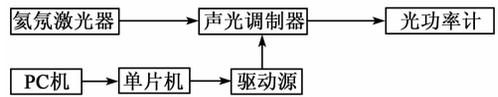


图 2 声光调制系统结构框图

2 数字电压控制电路设计原理

2.1 数字电位器的使用

DS3902 是一款双路、非易失(NV)、256 级、低温系数的数字可变电阻器,它可在 2.4~5.5 V 的宽电源范围内工作,通过 I²C 兼容的串行接口与器件通信。DS3902 可产生双路 256 级的线性数字电阻,满足实验需求,又因其具有低成本、小尺寸的特点,使其能替代传统机械式电位器,成为理想的实验仪器。数字电位器 DS3902 与单片机 AT89C52 接口电路如图 3 所示。其中 2、3 管脚分别接单片机的 P1.0 与 P1.1 接口,4、5 管脚相互连接并接地,7 管脚空置,8 管脚接 +5 V 电源。将电路连接并写入程序后,1 管脚 H0 与 GND 间的电路等效于电阻 $R_{(H0)}$,其大小为 0~15 k Ω ,其阻值由输入的程序决定,6 管脚 H1 功能与 1 管脚相似,可产生 0~50 k Ω 的电阻 $R_{(H1)}$ 。

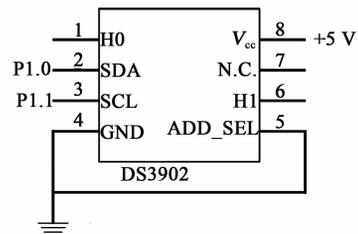


图 3 DS3902 与单片机 AT89C52 的连接电路图

2.2 恒流源电路

恒流源是模拟集成电路中广泛使用的一种单元电路,在实际中有广泛的应用。当给数字电位器供给恒定电流时可产生与之相对应的电压,调节恒流源电流的大小可得电压范围,通过单片机控制的数字电位器阻值可决定最终所得电压值,因为数字电位器 DS3902 阻值随着输入的数字信号线性变化,所以最终所得电压是线性变化的,通过 256 个档次的线性输入电压可观察记录激光在声光调制器调制下的衍射光对线性电压做出的响应。由运算放大器 CA3140、12 V 的基准电压源、电阻、三极管 9015 (9013)和数字电位器组成的正恒流源电路如图 4 所示。输出电流为

$$I = \frac{\beta_1 \beta_2}{1 + \beta_1 \beta_2} \frac{2.5}{R_0} \quad (3)$$

式中 β_1, β_2 分别为 2 个三极管的电流放大系数。可通过改变 R_0 控制电流 I , 因为 β_1 和 β_2 皆为 150, 数字电位器 H0 端口的最大电阻为 15 k Ω , 所需电压为 0~5 V, 所以电流为 0.333 mA, $R_0 = 7.5$ k Ω 。

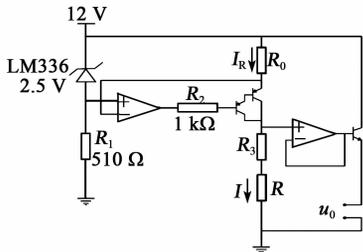


图4 恒流源电路

为使后续电路对已调好固定幅值电路不产生影响, 可使用电压跟随器, 使在输入、输出电压相等时不影响恒流源电路, 而因为 0.333 mA 的电流无法驱动声光调制器, 则使用射极跟随器, 在不影响恒流源电路时对电路中电流进行放大, 达到驱动声光调制器的目的。

2.3 电压调制电路

由于 256 个档次电压作用于声光调制器产生的一级衍射光强的变化呈非线性, 所以需要对电压进行调制, 使在 256 个档次电压下衍射光功率的变化呈线性。恒流源电路的输出电压为

$$u_0 = \frac{2.5}{R_0}(R + R_3) - 0.7V \tag{4}$$

改变 R_0 与 R_3 及 256 个档次的数字电阻器 R , 可实现对电压的调制。

CD4051 相当于一个单刀八掷开关, 使用单片机对 CD4051 的 A、B、C 3 个通道输入不同的地址码, 可接通需要的通道, 进而控制对应规格的 R_0 与 R_3 , 确定同一档位数字电压, 达到电压调制的目的。CD4051 的结构原理图如图 5 所示。

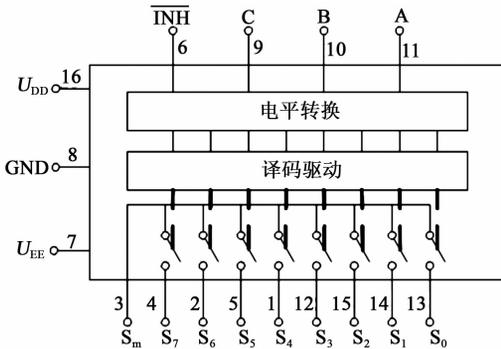


图5 CD4051 芯片结构及引脚功能

2.4 控制电路

控制电路由矩阵按键输入部分及数码管显示部

分组成, 通过按键对单片机输入不同档次的数字电压来控制数字电位器的阻值, 并用数码管显示当前档次, 进而改变声光调制器驱动器的输入电压, 达到控制激光束通过声光调制器后所产生的一级衍射光强度的目的, 控制电路结构如图 6 所示。

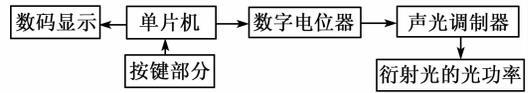


图6 控制电路结构图

3 实验结果及分析

实验中, 首先对数字电位器性能进行测试, 数字电位器 DS3902 的阻值为 0~15 k Ω , 为方便数据采集和整理, 我们在灰度等级均匀变化下采集了 64 组数据, 当采用恒流源电路(见图 4)时, 其输出电压与数字电位器的变化等级如图 7 所示。由图可知, 输出电压随灰度等级的提高而呈线性变化, 使用线性变化的电压增强了对声光调制器性能测量的可靠性与准确性。

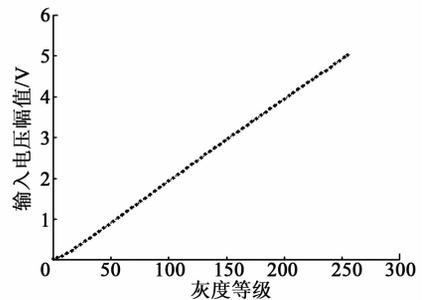


图7 电压与灰度等级的变化关系

使用由 633 nm 的半导体激光器、149 MHz 声光调制器、线性声光调制驱动源及光功率计等组成的光学系统对声光调制驱动源的工作性能进行研究分析, 半导体激光器通过声光介质产生的激光束为 0 级光, 然后给声光调制驱动源通电使其工作, 产生 149 MHz 的射频功率信号, 并通过电声换能器作用于声光晶体, 使其产生一个等效于声波波长间距的衍射光栅, 通过对固定声光器件的精密旋转台旋转适当的角度, 使声光调制器工作在布喇格衍射状态^[7-8]。输入电压不同时, 对声光调制器影响也不同, 而输入电压是随着数字电位器阻值的变化而变化的, 使用 256 级的数字电位器 DS3902, 可在 0~5 V 内产生 256 个线性变化的电压, 通过按键控制产生所需等级的电压, 进而改变声光调制的工作状态, 使激光通过声光调制器后由布喇格衍射产生的 0 级光与 +1 级光功率发生改变, 其 +1 级光功率在

线性电压下的变化如图 8 所示。

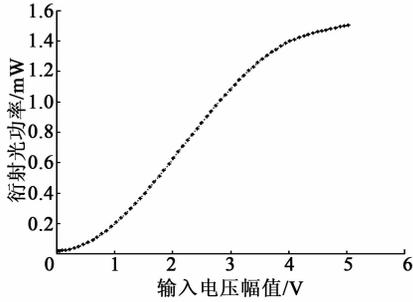


图 8 光功率在线性电压下的变化

由图 7、8 可知,在线性电压变换下,+1 级光功率是非线性的,且其光功率的变化规律与式(1)相对应,从另一个方面证明了数据可靠性与稳定性。

为了使衍射光功率在数字调制电压具有良好的线性关系,使衍射光功率的灰度变化范围达到最大,线性相关系数为 98.76% 时数字调制电压为 0.3~5.0 V,用最小二乘法可获得该区间的+1 级(或-1 级)衍射光功率 P 与此区间数字调制电压 U 的线性回归方程为

$$P = 0.352U - 0.0708 \quad (5)$$

由图 8 可知,在 $0.1 \text{ V} \leq U \leq 0.3 \text{ V}$ 时,声光调制器光功率无变化,则数字调制电压最小值 $U_{\min} = 0.3 \text{ V}$,最大值 $U_{\max} = 5 \text{ V}$,而其对应+1 级(或-1 级)衍射光功率最小值及最大值分别为 $P_{\min} = 0.027 \text{ mW}$, $P_{\max} = 1.502 \text{ mW}$,由此可得衍射光功率灰度值的变化梯度 $\Delta P = 0.0248$ 。

由 P_{\min} 及 ΔP 可得线性衍射光功率为 $P'_1 = 0.027 \text{ mW}$, $P'_2 = 0.0518 \text{ mW}$, $P'_3 = 0.0766 \text{ mW}$, \dots , $P'_{64} = 1.5894 \text{ mW}$ 。在此基础上,由式(5)算出 $U'_2 = 0.3483 \text{ V}$, $U'_3 = 0.4188 \text{ V}$, \dots , $U'_{64} = 4.7869 \text{ V}$,再通过式(4)及对数据分析可知,在恒流源电路下,使 $R_0 = 8.25 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 3.2 \text{ k}\Omega$,可产生使用最小二乘法所得电压,再次测量可得光功率与灰度等级间的关系,如图 9 所示。

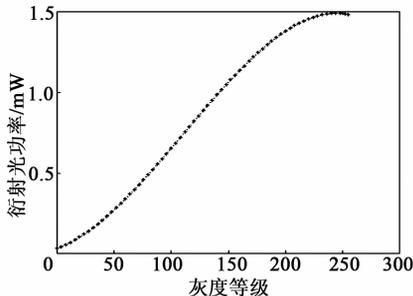


图 9 光功率与灰度等级之间的关系

由图 9 可知,经过最小二乘法处理过的电压可以改善衍射光功率与灰度等级的线性度,此时其线性相关系数为 99.30%。因声光晶体具有非线性特性,故输入电压均匀变化增长已不能满足其线性补偿的需求。为此,我们可将灰度等级分成几个阶段,并通过调节 R_0 使每个阶段中的衍射光功率与灰度等级都呈线性,再通过调节 R_3 使各个线性阶段处于同一条直线上。

通过对实验数据中光功率增长速度的分析,将 256 个灰度等级分成 4 个阶段:

- 1) 1~48 级。此时, $R_0 = 8.6 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 4 \text{ k}\Omega$ 。
- 2) 49~128 级。此时, $R_0 = 10.5 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 5.4 \text{ k}\Omega$ 。
- 3) 129~168 级。此时, $R_0 = 11 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 5.9 \text{ k}\Omega$ 。
- 4) 169~256 级。此时, $R_0 = 9 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 3.1 \text{ k}\Omega$ 。

将 4 个阶段的 R_0 与 R_3 分别代入式(4)中,并协同具有 256 级的数字电位器 R 来确定不同灰度等级的调制电压,此时经过数字调制的电压已具备线性补偿功能,补偿后,衍射光功率与灰度等级间的线性相关系数为 99.91%。图 10 为线性补偿前后衍射光功率与灰度等级的关系。

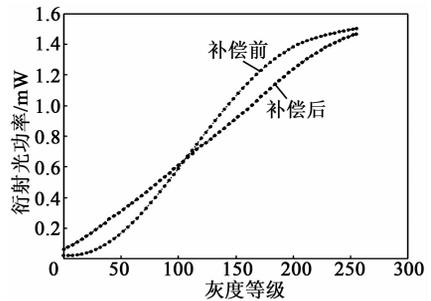


图 10 +1 级衍射光强灰度值随灰度等级变化

由图 10 可知,与线性补偿前相比,线性补偿后衍射光功率与灰度等级的线性相关度高。由实验结果可得,补偿后衍射光功率与灰度等级的线性相关系数为 99.91%,比补偿前提高了 1.15%。在衍射光功率的变化范围内,线性变化的衍射光功率的灰度等级达到了 256 级。

4 结束语

本文使用了具有 256 个档次的数字电位器 DS3902 为核心的恒流源电路,在 0~5 V 的输入电