

双路宽光谱近红外声光 可调谐滤光器驱动系统设计

高天学^a, 王志斌^{a,b}, 王玉江^a

(中北大学 a. 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心;

b. 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要:为满足双路宽光谱近红外声光可调谐滤光器(NIR-AOTF)对其驱动系统的要求,设计了一种基于高速单片机和直接数字频率合成器(DDS)的射频双驱动系统,采用软件查表法将各个频段驱动信号所对应的电压幅值控制字做成表并保存在单片机中,实现了DDS在各个频段的恒功率输出,使得NIR-AOTF在不同的波长衍射效率最佳;该系统主要由信号源模块、功率放大模块、射频开关模块及上位机控制模块组成,通过上位机下发频率、电压及信号通道控制字来产生两路功率恒定的射频信号,经过功率放大电路,驱动系统的输出信号功率可达33~35 dBm,使NIR-AOTF达到最佳工作状态,其0级光谱衍射效率测量值最高可达73%,驱动系统较好地满足设计要求。

关键词: NIR-AOTF; 信号源; 功率放大; 衍射效率

本文引用格式:高天学,王志斌,王玉江. 双路宽光谱近红外声光可调谐滤光器驱动系统设计[J]. 兵器装备工程学报, 2017(6): 146-150.

Citation format: GAO Tian-xue, WANG Zhi-bin, WANG Yu-jiang. Design of NIR-AOTF Drive System[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(6): 146-150.

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2017)06-0146-05

Design of NIR-AOTF Drive System

GAO Tian-xue^a, WANG Zhi-bin^{a,b}, WANG Yu-jiang^a

(a. Shanxi Provincial Research Center for Opto-Electronic Information and Instrument Engineering Technology;

b. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education,

North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to meet the double wide spectrum of near infrared acoustic optic tunable filter (NIR-AOTF) on its drive system, this paper designs a high speed MCU and direct digital frequency synthesizer (DDS) based on dual drive system of radio, using the software look-up table corresponding to each frequency band driving signal voltage amplitude control word made table and stored in the microcontroller, to achieve the DDS in the constant power output of each frequency band and the NIR-AOTF in different wavelength diffraction efficiency. The system mainly consists of signal source module, power amplifier module, RF switch module and PC control module, RF signal through the host computer under the frequency, voltage and signal channel control word to generate two constant power, through the power amplifier, the output signal power is 33~35dBm drive system, which makes NIR-AOTF achieve the best

收稿日期: 2017-02-25; 修回日期: 2017-03-26

基金项目: 国际科技合作项目“***成像光谱偏振仪联合研发”(2013DFR10150); 国家自然科学基金仪器专项基金项目“虚拟堆砌弹光调制高性能傅里叶变换光谱仪研究”(61127015)

作者简介: 高天学(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事射频信号的获取与处理研究; 王志斌(1966—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事测试计量技术及仪器、光电子技术与仪器、光学工程、光电信息工程研究。

working conditions with the diffraction efficiency up to 73%, and that the driving system can meet the design requirements.

Key words: NIR-AOTF; signal source; power amplification; diffraction efficiency

近红外声光可调滤波器(Near Infrared Acousto-Optic Tunable Filter, NIR-AOTF)作为当前近红外光谱成像光谱仪的一种新型声光器件,具有通光孔径和入射孔径大、衍射效率、分辨率高、波长任意切换、调谐灵活、范围宽的优点。国内外最早的驱动源主要采用直接频率合成技术(Direct Synthesis, DS),这是一种模拟手段的频率合成技术,通过硬件电路把一个或者多个基准频率变成一系列谐波,通过倍频、分频、混频等算数运算来获得所需要的频率。这种方法的优点是产生的信号频率分辨率高,频率转换时间较短,但是倍频、分频、混频等算数运算要采用大量的晶振、混频器等器件,造成频率源结构复杂、容易产生难以抑制的谐波和交调分量。之后出现了间接频率合成技术(Indirect Frequency Synthesis),间接频率合成技术主要是锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)技术。锁相环主要包括数字鉴相器、分频器、模拟环路滤波和压控振荡器4个部分。锁相环能够将所需的频率信号锁定,达到选择所需频率的目的,同时也抑制了其他频率信号,减少了杂散信号的干扰。但是锁频所需时间较长,不能实现较快的调频,频率分辨率较低也是难以克服的缺点。直接数字频率合成技术(Direct Digital frequency synthesis, DDS)是频率合成的第3代方案,具有快速跳频、极好的温度和老化稳定性、相位稳定等优点,AD公司、Qualcomm公司和Stanford公司有许多专业和性能很高的DDS芯片出现,方便了使用。国内研究人员也提出了许多改进方法,其中包括对DDS相位累加器的改进、抖动注入技术的使用以及对DDS工艺结构和系统结构的改进等。本系统采用DDS与高速单片机结合,在上位机的控制下产生30~80 MHz的频率以及功率可控的射频正弦信号,经过功率放大后加载在近红外声光可调滤波器的超声换能器上,在声光晶体中产生适当的超声波,形成声光相互作用,实现近红外波段的光谱选择^[1]。NIR-AOTF的衍射强度在一定范围内取决于驱动信号的功率,在不同的频段范围内所需功率也不相同,只有在各频段给NIR-AOTF施加适当功率的射频驱动,才能充分发挥其滤光作用,该系统采用的功率放大电路与传统的功放电路相比,采用了高集成度的无条件稳定功放芯片,无需额外的阻抗匹配,简化了电路结构。驱动系统的性能决定了NIR-AOTF的波长选择及衍射效率,因此设计高性能NIR-AOTF驱动系统对当前近红外波段的光谱成像技术具有重要应用价值。

1 NIR-AOTF 声光调制原理

NIR-AOTF系统基于反常布拉格(Bragg)衍射的声-光互作用的原理,当一束准直复色光以某一特定的入射角进入NIR-AOTF,当驱动源产生30~80 MHz的射频信号加载在超

声换能器上时,超声换能器把电振荡转成超声振荡,通过换能器与声光介质间的金属镀层传递到声光介质中形成超声波,在声光介质中通过声光相互作用,超声波将引起入射光的布拉格衍射,产生衍射光,从而起到滤光器的作用^[2],其衍射光的波长与超声波的频率有着对应的关系,只要改变驱动信号的频率,即可改变衍射光的波长。由于衍射光的衍射效率与驱动信号的功率在一定范围内成正比关系,所以NIR-AOTF驱动系统在各个频段应该尽可能提供足够的驱动功率给超声换能器,使衍射效率达到最大。该系统采用在一个通声面上制作两片厚度不同的换能器^[3],低频段超声换能器工作频率在30~55 MHz,高频段超声换能器工作频率在55~80 MHz,这样可以提高衍射波长范围,使衍射波长达到900~2 100 nm近红外光谱波段。NIR-AOTF工作原理如图1所示。

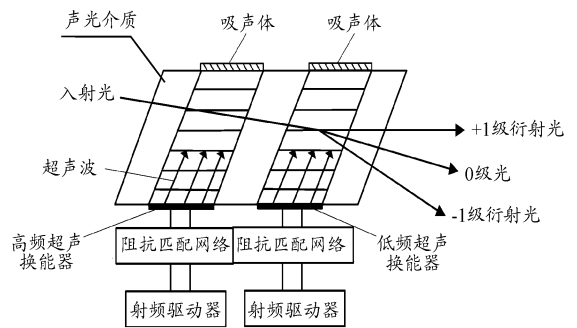


图1 NIR-AOTF工作原理

在反常Bragg衍射中,衍射光的偏振方向与入射光不同,入射光折射率与衍射光的折射率也不相等,故 $k_i \neq k_d$,当 $k_d = k_i \pm K$ 时即满足动量匹配条件,其动量匹配如图2所示。 θ_i 为入射角, θ_d 为衍射角, k_i 为入射波矢量, k_d 为衍射波矢量, K 为超声波矢量^[4]。

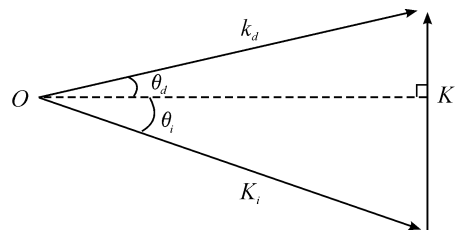


图2 反常Bragg衍射动量匹配条件

当信号加载到超声换能器上时,电信号会转换成声波信号在声光介质中传播,声光介质的折射率会因此发生变化,当超声波信号入射角、入射光方向给定时,对于一定的超声波频率 f ,有某个对应波长 λ 的入射光能满足动量匹配条件,产生衍射光。根据动量匹配的条件可得入射角 θ_i 与衍射角

θ_d 之间的关系,得到狄克逊方程:

$$\sin\theta_i = \frac{\lambda}{2n_i(\theta_i)v} \left\{ f + \frac{v^2}{\lambda^2 f} [n_i^2(\theta_i) - n_d^2(\theta_d)] \right\} \quad (1)$$

$$\sin\theta_d = \frac{\lambda}{2n_d(\theta_d)v} \left\{ f - \frac{v^2}{\lambda^2 f} [n_i^2(\theta_i) - n_d^2(\theta_d)] \right\} \quad (2)$$

其中: λ 为光在真空环境中的波长, v 是声音传播的速度, n_i 和 n_d 分别是 θ_i 和 θ_d 的函数。当声光介质 n_i 和 n_d 、 θ_i 和 θ_d 确定后,即可由狄克逊方程解出 $\theta_i - f$ 的关系和 $\theta_d - f$ 的关系,从而确定反常 Bragg 衍射的几何关系。结合 NIR-AOTF 矢量合成关系可得射频驱动频率与衍射波长的对应关系^[6]:

$$f(\lambda) = \frac{v_a [n_i^2 + n_d^2 - 2n_i n_d \cos(\theta_i - \theta_d)]^{1/2}}{\lambda} \quad (3)$$

式中 v_a 为矢量方向的超声波速度值。由式(3)可看出,当 n_i 和 n_d 、 θ_i 和 θ_d 确定后,衍射波长仅受射频驱动频率的影响,改变射频驱动频率即可改变相应的衍射波长。

2 射频驱动系统的设计

NIR-AOTF 的射频驱动系统主要由上位机控制界面、高速单片机、DDS 信号源、功率放大电路、射频开关等构成。DDS 芯片采用 AD9914,该芯片与传统芯片相比,频率分辨率高,频率控制字为 32 位,将其与高速单片机组合后只需通过上位机下发频率控制字便可产生 30 ~ 80 MHz 的高精度正弦波。功率放大电路采用了两级放大将 AD9914 产生的小信号放大到 34 ~ 35 dBm 加载到 NIR-AOTF 的声光换能器上。上位机控制窗口由 VC 编写而成,操作灵活,可以很方便的控制 DDS,实现近红外波段不同波长的选择^[7]。驱动系统结构如图 3 所示。

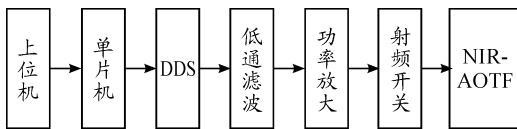


图 3 射频驱动系统结构

2.1 射频恒功率信号实现

本系统采用 STC12 系列单片机与 DDS 芯片 AD9914 结合,利用该系列单片机的 1T 指令模式,即执行指令时,一个时钟周期就是一个机器周期,比通用 8051 内核单片机执行速度快 12 倍,提高了单片机向 DDS 芯片写数据的速度,使得 DDS 快速输出 NIR-AOTF 需要的驱动信号。DDS 芯片选用了 AD9914,该芯片是一款内置 32 位相位累加器、16 位 DAC 的直接数字频率合成器,内部锁相电路可将外部晶振输入的 100 MHz 信号倍频到 2 GHz 作为内部系统时钟,可输出 1 GHz 的标准正弦波,频率分辨率 0.23 Hz,具有串行和并行输入两种模式,用户可以通过串行 I/O 口对 AD9914 内部控制寄存器进行编程控制 DDS 的信号控制参数,包括:频率相位与幅值,方便可靠,节省硬件资源^[11]。

NIR-AOTF 工作频率为 30 ~ 80 MHz,在此频段范围内不

同的工作频率所需驱动信号的功率各不相同。要使 NIR-AOTF 在每个频率的衍射效率达到最佳效果,射频驱动系统必须能够提供给 NIR-AOTF 在此频段需要的功率^[8]。从电学角度出发,NIR-AOTF 的大功率驱动信号是由 AD9914 芯片产生小信号经过功率放大后得到的,可以控制作为功放输入的 AD9914 小信号电压幅值实现 NIR-AOTF 在不同频段得到所需功率,因此本系统将 30 ~ 80 MHz 以 5 MHz 为单位划分为 10 组频段,每个频段对应一个电压幅值,如表 1 所示,将这 10 组电压幅值所对应的幅值控制字通过软件编程做成一个表保存在单片机中,每组控制字在此表中对应一个序列号,当需要某一组控制字时只需上位机下发此序列号便可以调用此组电压幅值控制字,这样该系统便实现了在不同的频段能提供恒定的驱动功率使 NIR-AOTF 衍射效果最佳。

表 1 NIR-AOTF 不同频段所需功率与 DDS 幅值控制字对应关系

序列号	频率/MHz	功率/dBm	DDS 电压幅值控制字
1	30 ~ 35	34.98	0x1fff0000
2	35 ~ 40	33.95	0x20ff0000
3	40 ~ 45	34.52	0x23ff0000
4	45 ~ 50	34.73	0x26ff0000
5	50 ~ 55	34.36	0x29230000
6	55 ~ 60	34.19	0x26230000
7	60 ~ 65	34.35	0x21ea0000
8	65 ~ 70	34.52	0x24ea0000
9	70 ~ 75	34.8	0x2a5b0000
10	75 ~ 80	34.72	0x2b050000

2.2 低通滤波及两级功率放大电路

AD9914 可输出高达 1 GHz 的模拟信号,为了防止其输出的镜频和二次谐波引起的锁相环错锁和调制,将电流 DAC 的输出转换为电压后,后接一个截至频率为 400 MHz 的低通椭圆滤波器来抑制这些杂散频率。椭圆滤波器在有限频率上既有零点又有极点,极点、零点在通带内产生等波纹,阻带内的有限传输零点减小了过渡区,可获得极为陡峭的衰减特性曲线,综合性能最佳。其电路如图 4 所示。

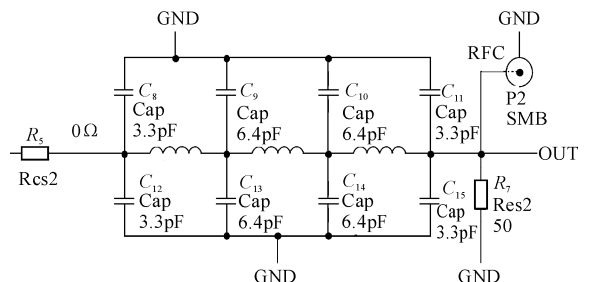


图 4 低通椭圆滤波器电路

NIR-AOTF 的阻抗随着射频驱动信号的变化也在变化,

如何让射频驱动器的输出功率能最大限度的输送到超声换能器成为目前该领域的一个技术难题,通常是在射频驱动电路中加一些阻抗匹配网络实现驱动器与 NIR-AOTF 功率匹配,只有二者的功率最佳匹配时,才会有最强最稳定的滤波效果,此时出射光的衍射效率最大^[9]。NIR-AOTF 换能器输入阻抗为 50 Ω,要实现较好的分光效果,就需要将功放电路输出阻抗匹配到 50 Ω,一个实现较好匹配的电路网络可降低功率损耗,有效抑制谐波,改善驻波比,提高输出功率。采用多级级联功放电路应注意极间匹配,本着电路元件最少,级联级数最少的原则,本系统采用两级级联方式实现,如图 5 所示,两级功放芯片均采用内部已实现 50 Ω 输入、输出匹配的芯片,芯片本身无条件稳定,这样可避免额外的阻抗匹配设计,获得最大增益和较好的线性度,更有利于降低输出损耗,为了兼顾信号带宽及功率放大电路的输出阻抗,在末级放大电路输出端设计了 1:4 阻抗变换器^[13]。

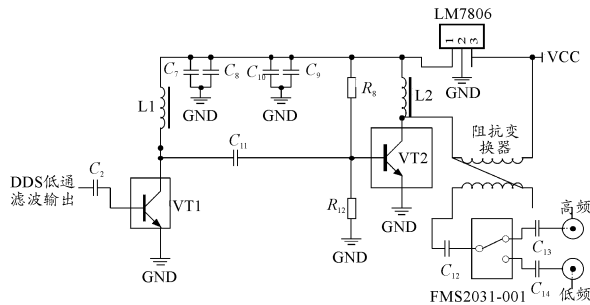


图 5 两级宽带射频功率放大电路

该电路由两个不同的芯片级联构成两级宽带射频功率放大电路,一级功放将 DDS 输出的小信号(6 dBm 左右)放大到 20 dBm 左右,二级功放进一步放大到 33 ~ 35 dBm,该电路带宽很宽,可以实现 30 ~ 80 MHz 的射频信号功率放大到 NIR-AOTF 所需功率。图中阻抗变换器由一定宽度和长度的铜线和高磁导率的铁氧体组成,用它来实现末级功率放大电路输出功率与 NIR-AOTF 的功率最佳匹配^[10]。电路中的功放芯片采用的是 2SK3476 和 TQP3M9008,这两款芯片有着非常宽的工作带宽,内部集成了电容电感等阻抗匹配元件,线性失真度低,功率转换效率 60% 以上。

2.3 双通道驱动信号实现

NIR-AOTF 采用在一个通声面上制作两片厚度不同的换能器^[3],低频段超声换能器工作频率在 30 ~ 55 MHz,高频段超声换能器工作频率在 55 ~ 80 MHz,这就要求其驱动系统能够提供两种数字可控的驱动信号。因此本系统采用单刀双掷砷化镓射频开关 FMS2031-001 作为驱动系统的末级输出,其控制端口受单片机控制,只需上位机下发高频、低频通道标志,便可实现任意通道转换,工作原理如图 6 所示。

2.4 上位机控制

AD9914 的输出频率是由 32 位频率控制字决定的,本射频驱动系统设计了单频和扫频两种工作模式。其中,单频通过 DDS 单频调制模式实现,扫频模式由上位机下软件编程实现,通过对频率控制字的调整获得不同频率的信号,对单

频振幅比例因子和 ASF 振幅比例因子的调节获得单频和扫频下的不同幅值。为了实现频率的实时控制,本系统基于 VC 设计了上位机控制界面,每个 VC 输入窗口都封存了相应的算法,上位机根据用户的输入情况作出判断,自动计算出此频率在单片机对应的电压幅值序列号及高、低频率通道标志位,直接通过鼠标即可实现单频、扫频两种模式的切换。图 7 为单频(手动)与扫频(自动)模式界面,直接输入起始截止频率便可实现 30 ~ 80 MHz 的频率扫描。

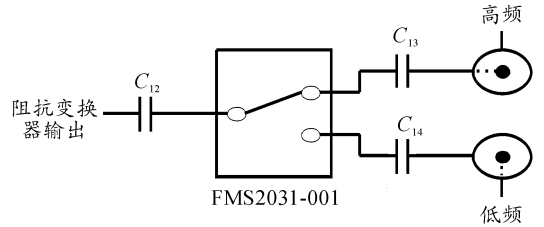


图 6 高、低频驱动信号转换原理

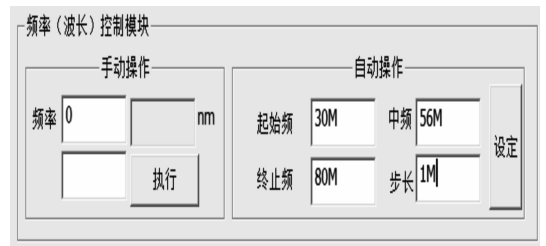


图 7 上位机单频与扫频模式界面

3 实验测试

实验中对驱动电路及 NIR-AOTF 衍射效率进行了分别测试,实验装置图如图 11。信号源电路与上位机通过 MAX232 实现串口通信,在 30 ~ 80 MHz 带宽内输出信号频率、功率稳定、频率转换速率快。图 8 是信号源频率为 30 MHz、80 MHz 时的正弦信号,图 9 是其功率放大后的功率谱,经过衰减器衰减 20 dBm 后测量得到。利用 AvaSpec-NIR256-1.7 光谱仪,在实验系统平台上进行了 NIR-AOTF 衍射实验测试,将可见光透过超声换能器,使 0 级光对准光谱仪探针,在光谱仪 avantes 软件中,实时观察在 30 ~ 80 MHz 频率范围内发生衍射及衍射强度,在 38 ~ 78 MHz 衍射范围内抽取若干点进行数据采集并对衍射图拟合^[5],如图 10 所示。利用 Matlab 对光谱仪采集的数据进行处理,得到表 2 所示数据。

近红外衍射效率的计算公式为

$$\eta = \frac{I_0 - I'}{I_0 - I'_{\min}}$$

其中 I_0 为原始光谱的总强度, I' 为经衍射后的光谱强度, I'_{\min} 为噪声强度,由此式得出衍射效率取决于衍射后的光谱强度^[12]。

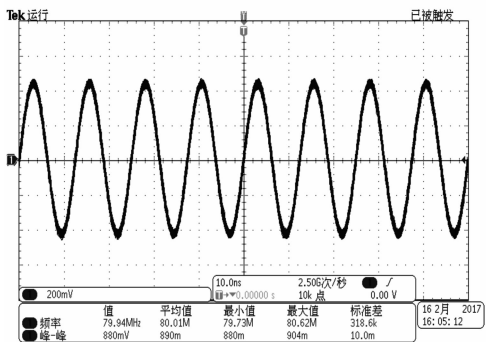
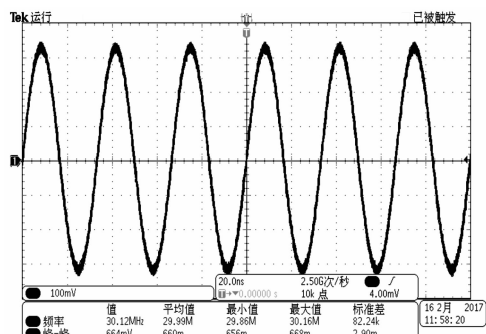


图8 30 MHz(上图)及80 MHz(下图)正弦波信号

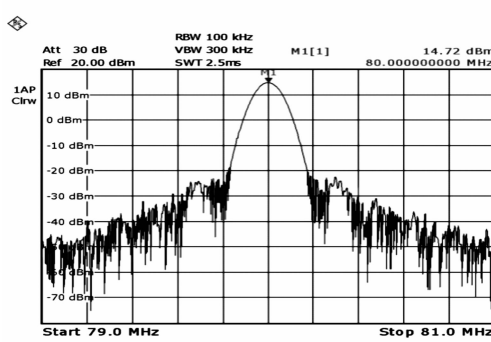
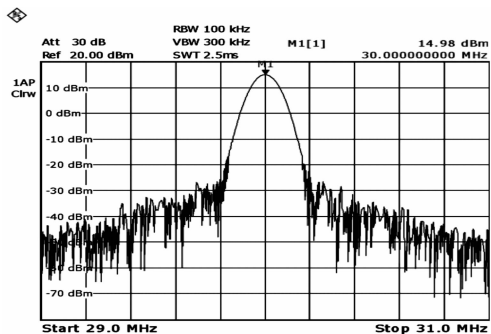


图9 30 MHz(上图)及80 MHz(下图)功率谱

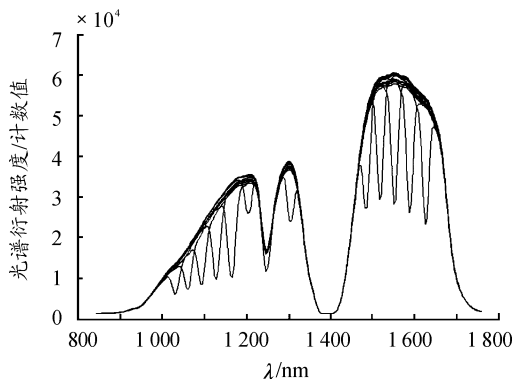


图10 NIR-AOTF 衍射效果

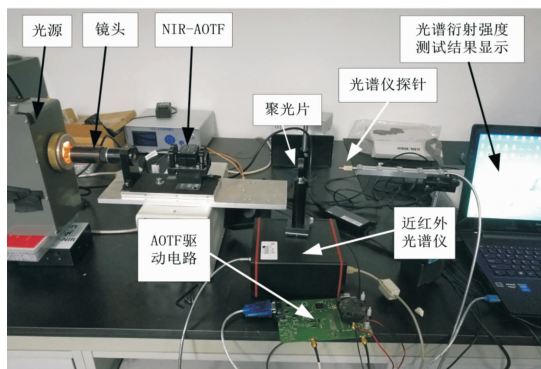


图11 NIR-AOTF 衍射实验装置

表2 不同频率衍射效率

驱动信号频率/MHz	38	43	48	53	56.5	58	63	68	73
实测波长/nm	1 709	1 517	1 374	1 247	1 173	1 147	1 060	987.1	924.8
衍射效率/%	47.41	51.52	38.03	31.47	73.12	69.62	61.23	49.75	34.57

4 结束语

本系统采用了高速单片机与高分辨率 DDS 产生特定频率的信号,采用软件查表法将各个频段驱动信号所对应的电压幅值控制字做成表并保存在单片机中,实现了 DDS 在各个频段的恒功率输出,使得 NIR-AOTF 在不同的波长衍射效率最佳。与传统的信号源相比,易控制,频率稳定度高,转换

速率快。功放电路采用内部已匹配好的芯片,避免了额外进行阻抗匹配,减少了因阻抗匹配产生的寄生效应,电路结构简单,且频带范围宽,通带内输出信号平稳。采用两级级联方式实现了 30 ~ 80 MHz 输出信号功率达 33 ~ 35 dBm。经实验验证,本文所设计的驱动系统可以驱动 NIR-AOTF 获得较好的分光效果,衍射效率达 73%,基本满足设计指标。

参考文献:

- [1] 刘景萍,吴大俊.毫米波引信共形天线的设计[J].制导与引信,2008,29(2):15-17.
- [2] 王月娟,张立东.宽频带引信天线的设计[J].制导与引信,2004,25(2):37-41.
- [3] 王杰.毫米波引信天线[J].制导与引信,1999,10(2):51-57.
- [4] 黄忠华,崔占忠,牛良永,等.小口径弹药引信介质天线设计[J].兵工学报,1999,20(1):76-78.
- [5] 林昌禄.天线工程手册[M].北京:电子工业出版社,2002.
- [6] RIDA A, TENTZERIS M, NIKOLAOU S. Design of Low Cost Microstrip Antenna Arrays for MM-Wave Applications [J]. IEEE International Symposium on Antennas & Propagation, 2011(5):2071-2073.
- [7] LEE MS, KIM YH. Design and Performance of a 24 GHz

- Switch-Antenna Array FMCW Radar System for Automotive Applications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(5):2290-2297.
- [8] JAYACHANDRAN M, GUPTA S C. Frequency Scanning Microstrip Antenna (S-band) [J]. International Radar Symposium, 1983, 27(2):175-180.
- [9] NESIC A, DRAGAS S. Frequency Scanning Printed Array Antenna [J]. Antennas & Propagation Society International Symposium, 1995, 2(2):950-953.
- [10] SUN Z, DAI Z, XUAN X, et al. A Wideband Frequency Scanning Microstrip Antenna Array with Low Profile [J]. International Conference on Mechatronic Sciences, 2013(11):3081-3084.
- [11] 何林涛.机载毫米波有源相控阵天线热设计研究[J].兵器装备工程学报,2016(5):115-119.
- [12] 约翰·克劳斯.天线[M].北京:电子工业出版社,2005.

(责任编辑 杨继森)

(上接第150页)

参考文献:

- [1] 俞宽新,丁晓红,庞兆光.声光原理与声光器件[M].北京:科学出版社,2011.
- [2] 宋雁鹏,李晓,王志斌.声光可调谐滤波器驱动系统设计[J].超声与声光,2015,37(4):721-725.
- [3] 张春光.基于超光谱成像系统的声光可调滤波技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学.
- [4] 苏金明,王永利. MATLAB7.0 实用指南[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [5] 杨丹,赵海滨,龙哲. MATLAB 图像处理实例详解[M].北京:清华大学出版社,2013.
- [6] NEELAM GUPTA, VITALY B, VOLOSHINOV. Development and characterization of two-transducer imaging acousto-optic tunable filters with extended tuning range [J]. Applied optics, 2007, 46(7):1081-1088.

- [7] 曾洪.声阻抗匹配层 OPCM 超声换能器的优化设计和实验研究[D].镇江:江苏大学.
- [8] 李存波,谢本亮. TeO₂ 超声换能器的外部匹配网络设计[J].超声与声光,2011,35(5):768-770.
- [9] 徐晓伟.超声换能器的阻抗匹配分析[J].超声与声光,2014,36(5):745-747.
- [10] RICHARD CHI-HSI LI (李缉熙). 射频电路工程设计[M].鲍景福,唐宗熙,张彪,译.北京:电子工业出版社,2011.
- [11] 徐兴福. ADS2011 射频电路设计与仿真实例[M].北京:电子工业出版社,2014.
- [12] 张泽红,赵治国,雷波,等.宽光谱声光可调滤光器[J].超声与声光,2013,35(1):19-23.
- [13] REINHOLD LUDWING, GENE BOGDANOV. 射频电路设计——理论与应用[M].王子宇,王心悦,译.北京:电子工业出版社,2013.

(责任编辑 杨继森)