

一种基于 Labview 快速实现 电光调制器射频阻抗匹配的方法

刘鑫鑫,张鹏飞,李刚,张天才[†]

(量子光学与光量子器件国家重点实验室,山西大学 光电研究所,山西 太原 030006)

摘要:电光调制器在量子光学、原子物理、激光光谱、光学控制和测量等许多方面具有广泛的应用,其射频阻抗匹配是重要的技术问题.文章在现有常用的射频匹配方法的基础上,运用 Smith 圆图,提出了一套简单快速实现电光调制器射频阻抗匹配的方法,包括网络构建的分析、设计并完成了在 Labview 环境下运用 Smith 图对电光调制器射频阻抗匹配网络设计的程序等.在此基础上,采用 Newfocus 4002 和 Thorlabs 公司的两种不同的电光调制器进行了实验.实验结果表明,在设计频率 53.047 MHz 和 97.977 MHz 处,匹配效率可以达到 99.05% 和 95.6%.

关键词:电光调制器;射频阻抗匹配;Smith 图;Labview

中图分类号:O431 文献标志码:A

0 引言

高速电光调制器不但在通讯和信息处理系统中具有广泛的应用,而且是量子光学、原子物理、激光光谱以及精密测量等实验中的关键器件.电光调制器的基本原理是运用电光效应,即通过加在晶体上的电压改变某些晶体(如 LiNiO_3) 在某个方向上的折射率,从而影响透过晶体的光的相位,实现对光波相位或强度的调制^[1].在使用电光调制器对光束进行射频调制时,由于电光调制器本身的电学特性的差异,需要对不同的调制器和特定的调制频率设计相应的射频匹配系统,减少因为射频信号反射可能导致的信号源和放大器的损坏,同时提高匹配效率并减小辐射功率,从而降低射频辐射对实验室环境的干扰.因此,电光调制器的射频阻抗匹配是一个重要的问题^[2].

一般的阻抗匹配是先获得负载(调制器)的参数,然后设计匹配网络.在负载虚电抗很小的情况下选择串联一个电阻,使最后的阻抗和信号源阻抗相同.在负载虚电抗很大的情况下,一般通常在负载上串联一个无耗元件,使两者在设计频率处共振,再用变压器将阻抗变送至信号源阻抗值.由于变压器的高频段特性比较复杂,从而使这种方法的实用性受到限制.在一般的电路阻抗匹配网络设计中,由于涉及复数运算,常用 Smith 图来分析^[3].由于 Smith 图非常直观,得到了广泛的运用. Smith 图虽然出现在二十世纪三十年代,但目前依然是电路阻抗分析、匹配网络的设计、噪声系数计算、增益计算的有效工具^[3].本文中我们运用 Smith 图,总结出一套对电光调制器射频阻抗匹配的方案,并采用两种不同参数的电光调制器进行了实验.这种方案与上面提到的两种方法比较,具有如下特点:1)结构简单,快速易行.采用此方案,电路能够快速实现快速装调,省时省力,适合不同的电光调制器.2)匹配宽度大,实用范围广.3)匹配效率很高,在设计频率点匹配效率可达 99% 以上,完全能够满足一般量子光学,原子物理,精密测量等实验中的要求^[4].

在本文接下来的部分我们将简单介绍一下 Smith 圆图的结构及原理,然后介绍利用 Smith 图实现电光调制器的基本方法和过程,第四部分介绍采用 Labview 程序实现两种不同的电光调制器的具体途径,最后是实验结果和总结.

* 收稿日期:2012-09-11;修回日期:2012-10-15

基金项目:国家自然科学基金(11125418;10974125;61121064);国家 973 课题(2012CB921601)

作者简介:刘鑫鑫(1987-),男,河南潢川人,硕士研究生,研究领域:量子光学. E-mail:1512717075@qq.com. † 通讯作者: E-mail:tczhang@sxu.edu.cn

1 Smith 圆图结构及原理

首先,定义系统的反射系数 Γ 为反射波电压与入射波电压之比,表示信号源阻抗与负载阻抗的失配程度:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \Gamma_r + j \cdot \Gamma_i \quad (1)$$

其中 Z_L 是负载阻抗, Z_0 是传输线特征阻抗, Γ_r 和 Γ_i 归一化反射系数的实部和虚部, j 为单位虚数.

$$z = \frac{Z_L}{Z_0} = r + j \cdot x \quad (2)$$

公式(3)(4)是 Smith 等阻抗圆表达式

$$\left(\Gamma_r - \frac{r}{r+1}\right)^2 + \Gamma_i^2 = \left(\frac{1}{r+1}\right)^2 \quad (3)$$

$$(\Gamma_r - 1)^2 + \left(\Gamma_i - \frac{1}{x}\right)^2 = \left(\frac{1}{x}\right)^2 \quad (4)$$

图 1(a)给出了一组等阻抗圆图,对应的参数分别为: $r=0, 0.5, 1, 1.5$; $x=-1.5, -1, -0.5, -0.25, 0.25, 0.5, 1, 1.5$.

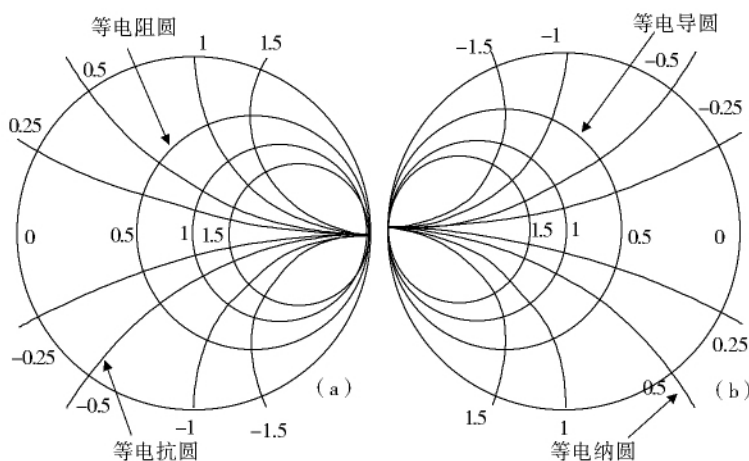


图 1 一组完整的 Smith 图, (a)等阻抗图, (b)等导纳图

Fig. 1 A full set of the Smith chart. (a): Impedance chart, (b): Admittance chart

如果令

$$y = \frac{1/Z_L}{1/Z_0} = g + j \cdot b \quad (5)$$

$$\left(\Gamma_r + \frac{g}{g+1}\right)^2 + \Gamma_i^2 = \left(\frac{1}{g+1}\right)^2 \quad (6)$$

$$(\Gamma_r + 1)^2 + \left(\Gamma_i + \frac{1}{b}\right)^2 = \left(\frac{1}{b}\right)^2 \quad (7)$$

图 1(b)给出了一幅典型的等导纳圆图. 对应参数分别为: $g=0, 0.5, 1, 1.5$; $b=-1.5, -1, -0.5, -0.25, 0.25, 0.5, 1, 1.5$.

Smith 圆图蕴含着丰富的物理意义,反映了射频电路的许多性质(参考文[2-3]),我们正是利用这些性质设计电光调制器的射频阻抗匹配电路.

2 阻抗匹配

从上面的讨论可知,当负载与驱动源实现完全阻抗匹配时, $\Gamma=0$,即在 Smith 图上负载处于原点. 根据负载上串联或并联元件时 Smith 圆图的性质,只要找到 Smith 圆图上负载点到原点的合理路径,并在负载上串联或并联相应的元件,原则上就可以使最后的负载和驱动源阻抗实现匹配.

下面我们结合实际例子看如何实现这个过程.

第一个需要实现阻抗匹配的是来自 Thorlabs 公司的 EO-AM-NR-C2 电光调制器. 该调制器的标称工作频率范围是 DC-100 MHz. 根据实验的需要,我们希望其工作在 98 MHz 左右. 实验上使用 Agilent 4396B 射频网络阻抗分析仪实测在 $f=97.977\ 025\ \text{MHz}$ 处,该调制器的负载阻抗为 $2.412\ 3\ \Omega-j*151.64*\ \Omega$,由于特征阻抗为 $50\ \Omega$,由(2)式,可知归一化后的负载阻抗为 $0.048\ 2-3.032\ 8*j$. 根据该归一化的负载阻抗,则归一化的负载导纳为 $Y_L=0.005\ 2+0.329\ 6*j$. 对应图 2 中的点 P. 当负载达到阻抗匹配时,端口反射率需要处于图 2 的 O 点. 于是,阻抗匹配的过程便是在 Smith 图上寻找由点 P 至点 O 的路径.

从对图 2 的分析中,我们至少可以找到八条可能的路径设计匹配电路(图 3—图 5),分别陈述如下.

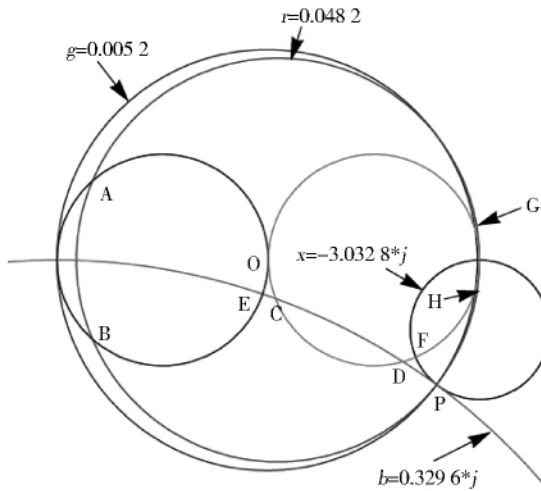


图 2 射频阻抗匹配路径上相关的点

Fig. 2 Points on RF impedance matching paths

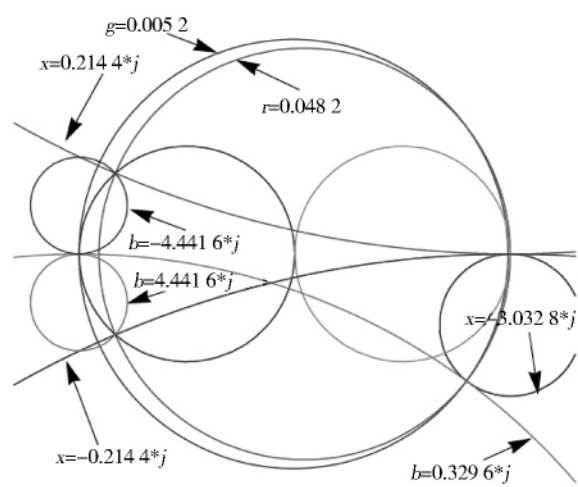


图 3 射频阻抗匹配路径(1)(2)

Fig. 3 RF impedance matching paths(1)(2)

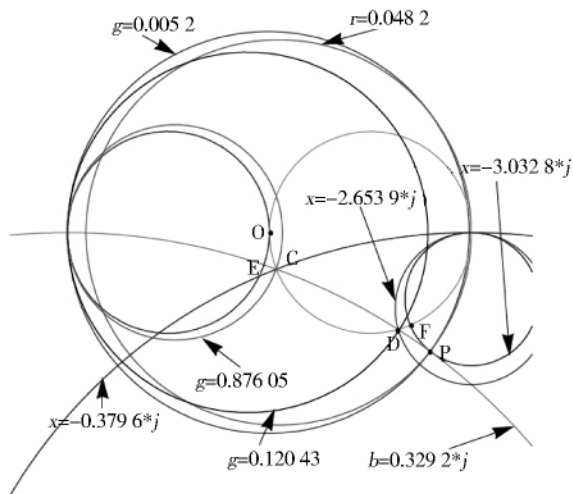


图 4 射频阻抗匹配路径(3)至(6)

Fig. 4 RF impedance matching paths from (3) to (6)

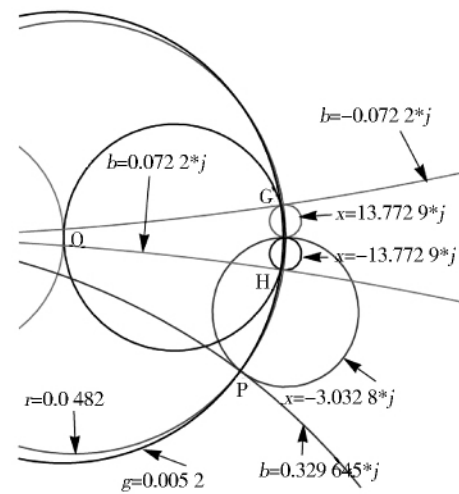


图 5 射频阻抗匹配路径(7)(8)

Fig. 5 RF impedance matching paths (7)(8)

路径(1):P 沿等电阻圆 $r=0.048\ 2$ 至 A,再沿等电导圆 $g=1$ 匹配至点 O

路径(2):P 沿等电阻圆至 B,再沿等电导圆 $g=1$ 匹配至点 O

路径(1),(2)对应图 6 中的电路(1),(2).

路径(3):P 沿等电纳圆 $b=0.329\ 645*j$ 至 C,再沿等电阻圆 $r=1$ 匹配至点 O

路径(4):P 沿等电阻圆 $b=0.329\ 645*j$ 至 D,再沿等电阻圆 $r=1$ 匹配至点 O

路径(5):P 沿等电阻圆 $b=0.329\ 645*j$ 至 E,再沿等电导圆 $g=1$ 匹配至点 O

路径(6):P 沿等电抗圆 $x=-3.032\ 8*j$ 至 F,再沿等电阻圆 $r=1$ 匹配至点 O

路径(3),(4),(5),(6)对应图 6 中的电路(3),(4),(5),(6).

路径(7):P 沿等电导圆 $g=0.0052$ 至 G,再沿等电阻圆 $r=1$ 匹配至点 O

路径(8):P 沿等电导圆 $g=0.0052$ 至 H,再沿等电阻圆 $r=1$ 匹配至点 O

路径(7),(8)对应图 6 中的电路(7),(8).

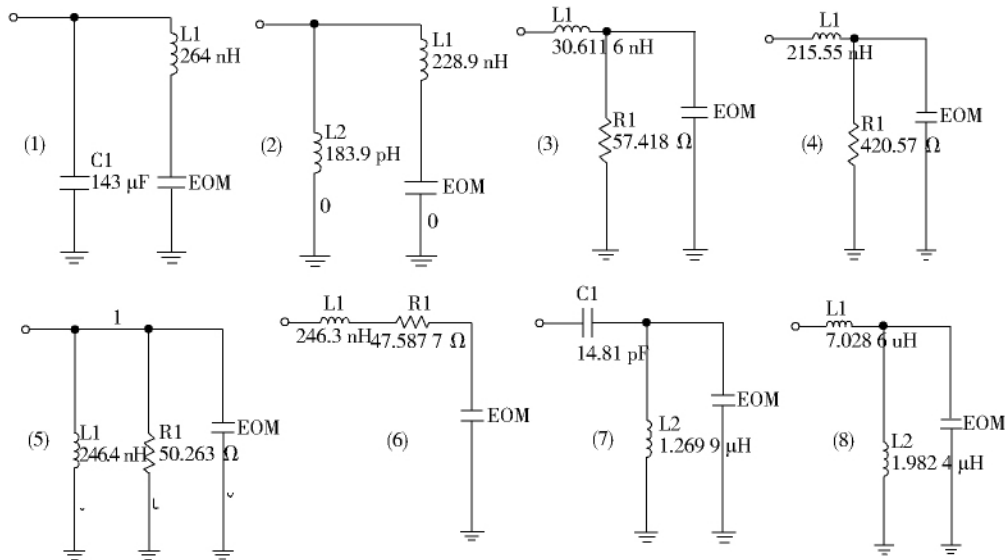


图 6 八种匹配方案对应的电路图

Fig. 6 Total eight circuits corresponding to abovementioned eight RF impedance matching schemes

从上面的分析可以看出,方案(3)(4)(5)(6)需要在匹配网络中加入电阻,即损耗,从而降低了共振环路 Q 值,这将影响射频频段下共振型电光调制器的工作条件.因此可以选择方案(1)(2)(7)(8)中的一种.在下面的实验中,我们选择了第(1)(2)(7)(8)种方案.

3 在 Labview 环境下处理阻抗匹配问题

在上面的实例中我们看到,采用 Smith 图可以方便地在射频段实现阻抗匹配过程.但实际过程中的计算精度取决于圆图中必须有足够的圆周数,而过多的圆周会导致图线过于密集,不便将阻抗、反射系数等相关数据从图上直接读出.通过对 Smith 圆图结构以及应用的分析,我们采用 Labview 编程可以解决这个问题. Labview 已经被广泛应用到各种控制和测量中.我们发现 Labview 非常适合于运用 Smith 图解决阻抗匹配问题^[7].利用 Labview 中的 Smith Chart 的子 Vi,只要定义好 Smith 图中曲线(点)的属性,输入点的阻抗(导纳),就可以在 Smith 图上描绘出所有的阻抗(导纳)的坐标.

在此基础上,我们编写了的数据显示程序模块,该程序可以在 Smith 图上描绘出所有欲标示的点,可以选择点所在的区域,进行任意倍数的放大,以便更清楚地显示 Smith 图的细节情况.图 7(P53)是三个不同的阻抗值 $0.5+1*j$, $0.5+1.02*j$, $0.5+1.04*j$, $0.5+1.06*j$ 在 Smith 图上被标示于 A, B, C, D 四点,由于相隔太近,在整张 Smith 图上无法被分清,而程序中加载的放大功能就解决了此问题,有助于清楚直观地看到 Smith 图上的阻抗匹配路径.

在所有的匹配方案中,最重要的是选择合适的中间点(起始,目标点均已确定),只要获得中间点坐标,即可获得电路中的诸元件阻抗.当匹配网络中的各元件是纯电抗时,中间点坐标寻找相对容易,如上面讨论原理时举出的例子.但理想的无损耗元件是不存在的,损耗的插入使我们在阻抗匹配网络设计计算中需要加入修正.在 Labview 中我们用循环体解决了此问题.图 8(P53)中显示该循环过程的示意图.

下面我们详细叙述此程序的操作过程.

图 9(P53)显示的是我们编写的程序的前面板图.在此程序中,只要输入电光调制器的阻抗值、匹配频率以及驱动源归一化阻抗值,选择串联或者并联阻抗匹配方案,就能获得相应的匹配网络电路图和完成匹配所需要的各元件参数.以本实验所用的 New Focus 公司出品的 Model 4002 型电光调制器为例,该电光调制器在调制频率 $f=53.047$ MHz 测到的阻值抗为: $0.9347 \Omega - j * 85.461 \Omega$.该数据由 Agilent 4396B 射频网络

阻抗分析仪测量获得,阻抗分析仪自带驱动源的归一化阻抗为 50Ω . 选用串联匹配方式,运行之,得到相应的匹配结果.

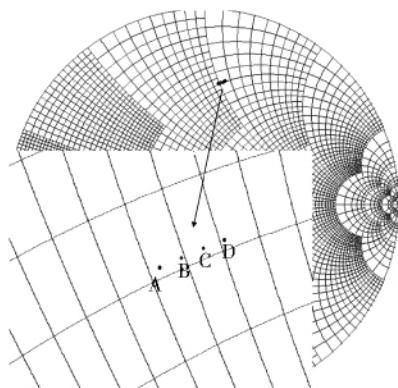


图 7 Smith 图上四点和这些点所在区域的放大
Fig. 7 Four points on a Smith chart and the inset zooms in the four points

按照方案(2)我们在实验上绕制匹配网络的元件. $Z_1 = j * 78.6889 \Omega$, $Z_2 = j * 6.9011 \Omega$. 显然, Z_1, Z_2 均为电感(线圈),可由漆包线绕制而成. 实际制作成的元件参数经过测量为: $Z_1 = 0.77034 \Omega + j * 78.6889 \Omega$, $Z_2 = 0.009542 \Omega + j * 6.9011 \Omega$. 把 Z_1 和 Z_2 的实测阻抗的电阻部分输入程序. 经过运行,获得修正后的元件阻抗为: $Z_1 = 0.77034 \Omega + j * 76.1357 \Omega$, $Z_2 = 0.009542 \Omega + j * 9.63614 \Omega$. 这样就完成了在 Labview 环境下对 New Focus Model 4002 电光调制器在调制频率 $f = 53.047 \text{ MHz}$ 处的阻抗匹配网络电路的设计,在 Smith 图上的匹配路径可以由程序读出. 最终的匹配电路如图 10.

使用 Labview 编程处理电光调制器阻抗匹配的好处还有其他方面. 如果我们测得电光调制器在其调制频率范围内所有频率的阻抗值,而匹配网络采用可编程的 PLC 组件控制各元件的阻抗值,那么,由于 PLC 有和上位机通信的接口,因此可以对应不同的调制频率,设置各元件阻抗值,实现对电光调制器调制频率的实时远程控制^[8]. 在有些实验中希望能够连续或者快速地变化调制频率,这时就需要这样的功能.

4 实验过程及结果

我们采用上文提到的 New Focus 公司出品的 Model 4002 型电光调制器进行了实验. 按照上文中用程序生成的阻抗匹配网络电路(图 10),在阻抗分析仪上,通过调整电感线圈疏密,把元件进一步调整至以上值,然后在 PCB 板上焊接元件. 最后阻抗分析仪测量匹配网络后的电光调制器的匹配性能.

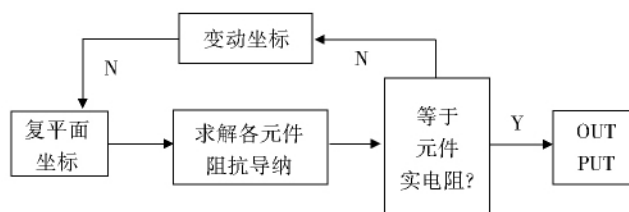


图 8 循环体结构
Fig. 8 Scheme of the loop

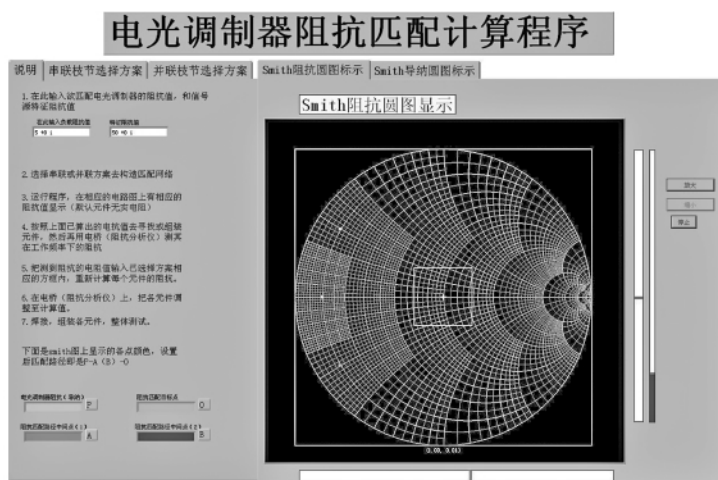


图 9 程序前面板
Fig. 9 Front panel of the program

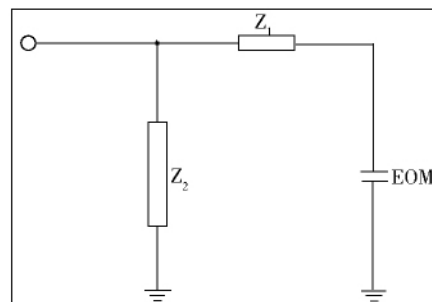


图 10 对 New Focus Model 4002 电光调制器在调制频率 $f = 53.047 \text{ MHz}$ 设计的阻抗匹配网络电路
Fig. 10 Impedance matching circuit designed for an EOM (New Focus Model 4002) at $f = 53.047 \text{ MHz}$

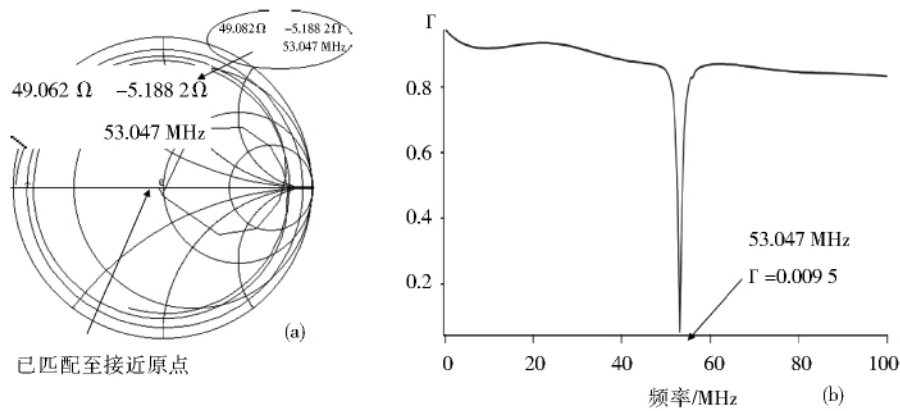


图 11 实测最终的 New Focus Model 4002 电光调制器阻抗匹配结果.

(a) Smith 图, (b) 反射率

Fig. 11 Measured results of impedance matching for the EOM

(New Focus Model 4002). (a) Smith chart, (b) Reflection

图 11(a)是最终完成的 New Focus 公司的 Model 4002 型电光调制器匹配效果的 Smith 图. 我们可以看到, 匹配后阻抗接近. 图 11(b)是经匹配后的电光调制器反射率, 在我们设计的匹配频率 53.047 MHz 处, 反射率 0.009 5, 匹配效率 99.05%.

实验过程中我们按照完全相同的方法对 Thorlabs 公司的 EO-AM-NR-C2 型电光调制器在调制频率 97.977 025 MHz 进行了阻抗匹配, 最终测得反射率 0.044, 匹配效率也达到了 95.6%. 其结果如图 12 中的 (a)和(b)图所示.

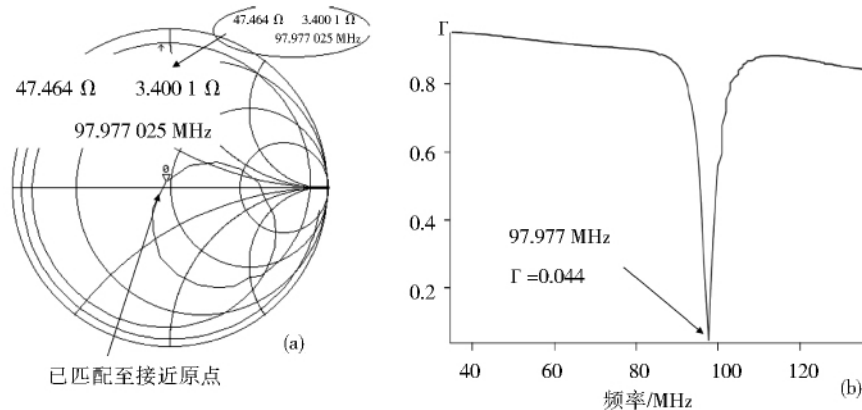


图 12 实测最终的 Thorlabs 公司的 EO-AM-NR-C2 电光调制器阻抗匹配结果

(a):Smith 图, (b):反射率

Fig. 12 Measured results of impedance matching for Thorlabs EOM, (a) Smith chart, (b) Reflection

值得指出的是, 在采用本方法实现对电光调制器阻抗匹配以前, 很难达到这样的匹配效果. 利用该匹配装置, 我们获得了很好的匹配效果. 我们采用该射频阻抗匹配实现了激光的射频边带调制. 如图 13(P55)是我们采用 F-P 腔(自由光谱区 1.7 GHz, 腔线宽 2.6 MHz, 调制频率 53.047 MHz)所观察到的激光的边带信号及其解调误差信号, 使用的射频功率只有 260 mW. 该系统用于激光频率链和激光的锁定, 是腔量子电动力学实验和原子操控的重要部分^[9-10].

5 结语

本文我们研究了一个在光电实验和控制中被广泛涉及的光电调制器的阻抗匹配问题. 这个问题虽然看似简单, 但是要达到很好的效果往往不容易. 我们利用 Smith 圆图, 对电光调制器的射频阻抗匹配的原理进行了分析, 总结几种射频阻抗匹配的设计方案. 然后依据 Smith 图, 在 Labview 平台上编写了用于电光调制器的射频阻抗匹配网络设计计算程序. 最后利用该程序和匹配方法, 完成了两种不同的电光调制器的阻抗匹

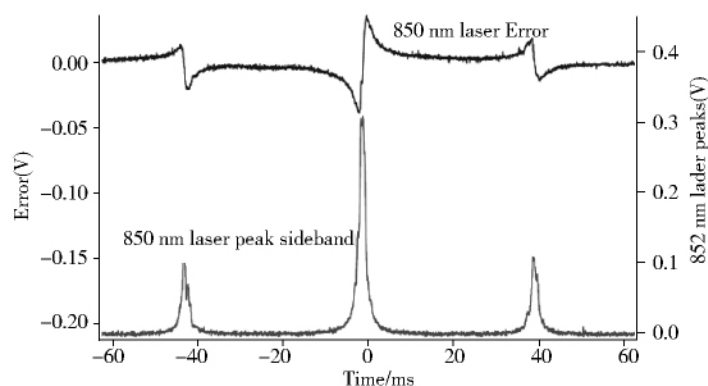


图 13 使用阻抗匹配后的 New Focus Model 4002 EOM 获得的激光 F-P 腔透射的边带信号及误差信号

Fig. 13 Laser sidebands and the error signals obtained from the transmission of a F-P-cavity by using the impedance matched EOM (New Focus Model 4002), which shows that the EOM has been well matched

配. 最后测试表明,两种电光调制器均在设计频率处达到了理想的阻抗匹配. 该方法简单易行,快捷有效,非常适用于量子光学,原子物理,激光光谱以及精密测量等实验中对各种调制器的阻抗匹配. 这种方法和程序,也可以应用到其它需要射频阻抗匹配的地方. 经过与计算机控制结合,能够应用到连续或者可变的射频匹配中,实现远程控制.

参考文献:

- [1] 李开成,张健梅,戴建华. 基于电光效应的几种光纤电压传感器[J]. 高压电器,2008,37(1):41-43.
- [2] Radmanesh M M. Radio Frequency and Microwave Electronics Illustrated[M]. Prentice Hall,2001:78-83.
- [3] Chan K C, Harter A. Impedance Matching and the Smith Chart[J]. *RF Design magazine*,2000(7):205-207.
- [4] 蓝信钜. 激光技术[M]. 武汉:华中科技大学出版社,1995:73-76.
- [5] Smith P H. An Improved Transmission-Line Calculator[M]. *Electronics*,1944.
- [6] Pozar D M. 微波工程[M]. 张肇仪,译. 北京:电子工业出版社,2010.
- [7] Johnson. LabVIEW Graphical Programming [M]. McGraw-Hill Professional,2006:13-15.
- [8] 西门子有限公司. SIMATIC, S7-200 系统手册[S]. 2003.
- [9] Zhang P F, Guo Y Q, Li Z H, et al. Temperature Determination of the Cold Atoms Based on Single Atom Countings[J]. *J Opt Soc Am B*,2011,28(4):667-670.
- [10] Zhang P F, Guo Y Q, Li Z H, et al. Elimination of the Degenerate Trajectory of Single Atom Strongly Coupled to a Tilted Cavity TEM₁₀ Cavity Mode[J]. *Phys Rev A*,2011,83:031804.

Fast Implementation of Impedance Matching for Electro-Optic Modulator Based on Smith Chart and Labview

LIU Xin-xin, ZHANG Peng-fei, LI Gang, ZHANG Tian-cai

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,
Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Electro-optic modulator (EOM) has been widely used in many fields, such as optical communications, optical control and measurement and it is also used for quantum optics, atomic physics, laser spectroscopy, etc. The RF impedance matching of the EOM is an important technical issue. Based on the usual RF matching principle and method, and by using the Smith Chart, we propose a set of reliable and rapid method of RF impedance matching for an EOM, which includes the analysis of a network construction, the design procedures by using Smith chart in LABVIEW environment. We demonstrate the method on two EOMs from New Focus 4002 and Thorlabs. The results show that the impedance matching efficiencies are 99.5% and 95.6% at the design frequency of 53.047 MHz and 97.977 MHz, respectively.

Key words: Electro-optic modulator; RF Impedance match; Smith chart; Labview