

调频连续波激光雷达发射源“种子光”调制性能研究

熊智鹏 李琦 王 骐

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要 调频连续波(FM-CW)激光雷达是一种新体制光学非相干雷达,如何在发射源部分获得宽带调制的大功率连续激光发射是一个关键技术。对 CQF935/5624 型和 EM650 型激光器两种“种子光”光源的调制性能进行了研究。对相关器件的性能进行了测试,分别对二者的调制性能进行了实验研究,讨论了调制非线性因素对调制性能的影响。实验结果表明,二者都具有良好的调制性能,有望在将来获得进一步的应用。EM650 型光源因其集成化的特点更具优势。

关键词 光学器件;激光雷达;调频连续波;种子光;调制

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.s128003

Research on Modulation Performance of the “Seed Laser” in Emission Source of FM-CW Ladar

Xiong Zhipeng Li Qi Wang Qi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150081, China)

Abstract Frequency-modulation continuous-wave (FM-CW) ladar is a new kind optical incoherent ladar. In its emission source, how to get a broadband modulated high-power continuous laser emission is the key technology. Two kinds of “seed laser” source, CQF935/5624 and EM650, are studied respectively. The performance of the related devices is tested and the results are given. The modulation performance is researched by conducting a series of experiments. The influence of the nonlinear factor on the modulation performance is discussed. The experimental results indicate that both the two “seed laser” sources have a good modulation performance, which can lead to a further application in the future. EM650 has more advantages for its integration.

Key words optical devices; ladar; frequency-modulation continuous-wave; seed laser; modulation

OCIS codes 010.3640; 130.4110; 280.3640

1 引 言

调频连续波(FM-CW)激光雷达是由美国陆军实验室(ARL)率先报道的一种低成本、小型化、全固态的调频/连续波激光雷达^[1]。在 FM-CW 激光雷达系统中,如何在发射源部分获得一个宽带调制的大功率连续激光发射是一个关键的技术。FM-CW 激光雷达^[2~6]在之后的十几年的发展历程中,发射源部分的调制方式经历了从直接调制到外调制的转变。

2004 年,ARL 提出了第二代 FM-CW 无扫描成像激光雷达系统^[5,6],即啁啾调幅(Chirped AM)舰船

跟踪激光雷达系统。在该雷达系统的后续报导中,ARL 使用了一种“种子光”调制方案,即采用了三菱公司生产的低功率 1550 nm 分布反馈式(DFB)直接调制激光二极管(ML925B11F)作为“种子光”,利用掺铒光纤放大器(EDFA)对其输出进行放大,获得的强度调制激光的峰值功率为 9.75 W,平均功率为 6.3 W,在 25 MHz~1 GHz 频率内平均调制深度为 70%。

经过对大功率激光调制方法的调研,直接调制方式在带宽、调制深度和输出功率等特性上均受到

收稿日期: 2013-01-20; **收到修改稿日期**: 2013-03-20

作者简介: 熊智鹏(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达光源方面的研究。E-mail: xzp_1989@163.com

导师简介: 李琦(1963—),女,博士,教授,主要从事激光雷达与太赫兹成像等方面的研究。E-mail: hit_liqi@yahoo.cn

一定的限制^[7~9],难以满足 FM-CW 激光雷达高性能的调制要求。外调制中的集成光学调制器[如马赫-曾德尔(M-Z)波导调制器]具有更好的调制性能^[10~14],具有宽调制带宽、高深度和低功耗等突出优点,可能是现阶段更好的调制方案。国内对 FM-CW 激光雷达发射源已经有一些相关的研究^[15,16]。

本文正是采用“种子光”调制方案,分别使用 CQF935/5624 型和 EM650 型激光器作为“种子光”光源,M-Z:LN 强度调制器作为外调制器,对两种“种子光”光源的调制特性进行了一系列实验研究。

2 M-Z:LN 强度调制器原理及实验相关器件

2.1 M-Z:LN 强度调制器原理^[17,18]

铌酸锂(LN)强度调制器采用 M-Z 干涉式结构。基本原理是基于铌酸锂晶体的电光效应构成两路反相的相位调制,在输出端干涉合成一路强度调制输出。该过程如图 1 所示。

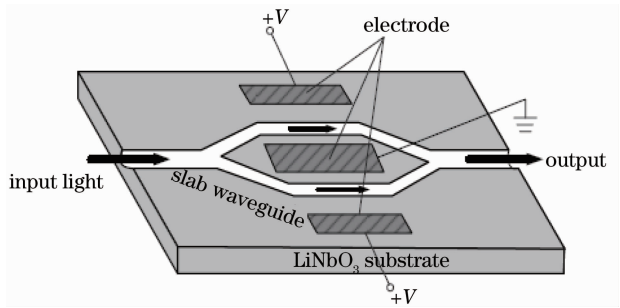


图 1 M-Z:LN 强度调制器

Fig. 1 M-Z:LN intensity modulator

设频率为 ω_c 、幅值为 E_{in} 的入射光波电场分量为

$$E_{in}(t) = E_{in} \exp(i\omega_c t). \quad (1)$$

经理想 Y 分支波导平分两路:

$$E_1(t) = E_2(t) = \frac{E_{in}}{\sqrt{2}} \exp(i\omega_c t), \quad (2)$$

两路分别发生相位延迟,在 M-Z 调制器的输出端混合为

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}}{2} \left[\exp\left(i\omega_c t + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \exp\left(i\omega_c t - \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right]. \quad (3)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为总的相位延迟。上式变形得

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right), \quad (4)$$

将 $\Delta\varphi$ 写成调制电压 V_m 的函数形式,得到 M-Z 调制器的光强调制的透射率为

$$T(V_m) = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_m}{V_\pi}\right). \quad (5)$$

从(5)式可以看到,输出光强与调制电压是余弦变化关系。由于调制曲线是非线性的,需要给 M-Z 调制器一个合适的直流偏压使其工作在调制曲线的近线性区域,减少波形失真。以后的实验测试中会给出这种波形失真的实测结果。

2.2 调制非线性引起的畸变

根据上面得到的光强调制率表达式得到光强调制曲线,如图 2 所示,可以看到,由于光强调制的曲线是非线性,会使输出的强度调制波发生失真。这种失真在时域上表现为调制波形发生畸变,而这种畸变会影响 FM-CW 激光雷达的测距性能。

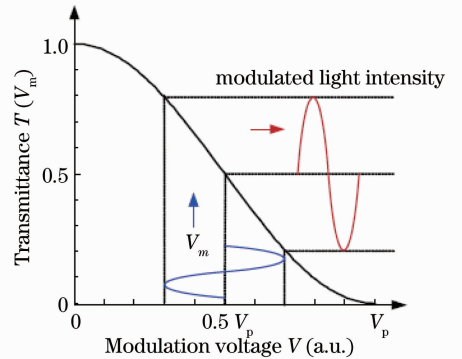


图 2 M-Z 调制器的调制曲线

Fig. 2 Modulation curve of M-Z modulator

光强调制余弦曲线存在单调的近似线性的部分,称之为调制线性区。如果把调制器的工作点设置在调制线性区内会减小调制非线性因素引起的波形畸变。在实际设置时应分别找出使透射率最大时的调制电压 V_{max} 和使透射率最小时的调制电压 V_{min} 。把调制器的工作点设置为 V_{max} 和 V_{min} 的平均值,大小可以略有浮动。

2.3 实验相关器件

第一种“种子光”光源使用 JDSU 公司研制的 CQF935/5624 型,1550 nm 分布反馈多量子阱(DFB-MQW)单模激光器,具有很高的边模抑制比,非常低的相对强度噪声,窄线宽以及极好的热稳定性。与之配套使用的是一个模块化的 LDTC0520 型驱动和温控集成电源,驱动级低噪声运转,最大提供 500 mA 驱动电流,温控级最大提供 2.2 A 的热电致冷(TEC)电流,长期稳定性达到 $0.003\text{ }^\circ\text{C} \sim 0.001\text{ }^\circ\text{C}$,噪声低,具有欠压保护和冷、热电流限,提高安全性。使用时二者通过相应的管脚建立连接,工作过程中 LDTC0520 对 CQF935/5624 进行驱动和温控。这两个器件的实物如图 3 和图 4 所示。

第二种“种子光”光源使用的是 EM650 型模

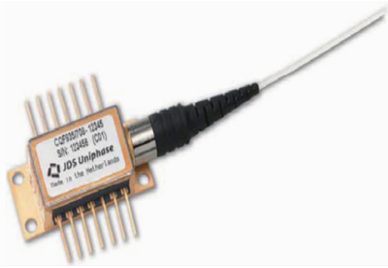


图 3 CQF935/5624 外观图

Fig. 3 Outside view of CQF935/5624



图 4 LDTC0520 外观图

Fig. 4 Outside view of LDTC0520

块,它是美国 EM4 公司近两年推出的一款集成的 DFB 激光器模块,它集成了电流源、温度控制器、光功率监控的放大电路以及半导体激光器。其尺寸仅为 $63.5\text{ mm} \times 57.2\text{ mm} \times 19.6\text{ mm}$,从小型化方面考虑,具有明显的优势。而且使用更为简单,只需要 5 V 供电即可,具有小型化、窄线宽、高的边模抑制比,非常低的相对强度噪声等特点。该模块可能是现阶段作为“种子光”光源更好的解决方案。其实物图和工作时与外界的连接图如图 5 和图 6 所示。



图 5 EM650 外观图

Fig. 5 Outside view of EM650

实验中使用的调制器是法国 Photline 公司生产的一款模拟应用的 M-Z·LN 强度调制器。该调制器使用沿 X 轴切割,沿 Y 轴传播的 Ti 扩散波导 LN 晶体,是一个 $1530 \sim 1550\text{ nm}$ 波段高性能光强调制器,具有良好的射频(RF)响应平坦性和较小的回波损耗,能够实现高线性、低畸变调制,其实物如

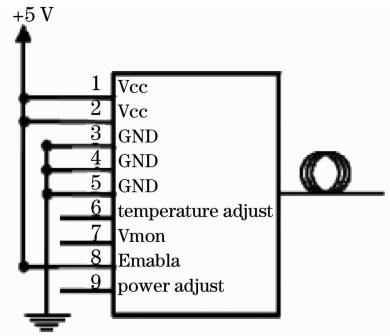


图 6 管脚连接图

Fig. 6 Pin connection diagram

图 7 所示。



图 7 M-Z 强度调制器外观图

Fig. 7 Outside view of M-Z intensity modulator

3 “种子光”实验研究

3.1 器件的输出特性测量

首先测量了 CQF935/5624 的 $P-I$ 曲线。使用 EM1715A 型直流稳压电源对 LDTC0520 进行直流供电,将 LDTC0520 与 CQF935/5624 对应的管脚进行连接,LDTC0520 对 CQF935/5624 进行温控和驱动。CQF935/5624 的输出端通过 FC/APC 接口连接到 PM32B 型光功率计上,通过调节 LDTC0520 电流控制管脚使用光功率计测量 CQF935/5624 的

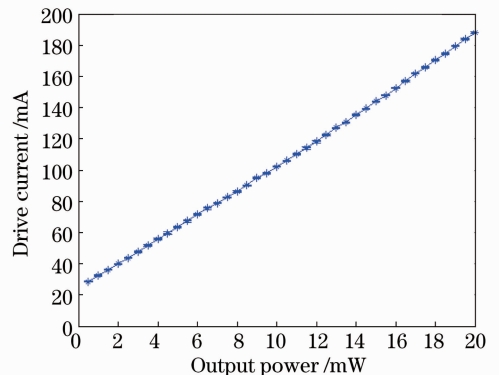


图 8 CQF935/5624 输出特性

Fig. 8 Output characteristics of CQF935/5624

输出功率。测量结果如图 8 所示,功率测量精度为 5%。CQF935/5624 的阈值电流为 $I_{th} = 22 \text{ mA}$,最大出纤功率超过 20 mW,从图中可以看出 $P-I$ 曲线近似为一条直线,斜率为 0.1235 mW/mA 。

然后对 EM650 输出功率的稳定性进行了的测量,测试条件如下:使用 EM1716 型直流稳压电源对 EM650 进行供电,EM650 的输出端通过 FC/APC 接口连接到 PM32B 型光功率计上。输入电压为 4.9 V,输入电流为 0.7 A。测量结果如图 9 所示,从图中可以看到,EM650 具有极好的功率稳定性。在长时间的观察过程中,光功率计测得的功率基本没有发生变化。

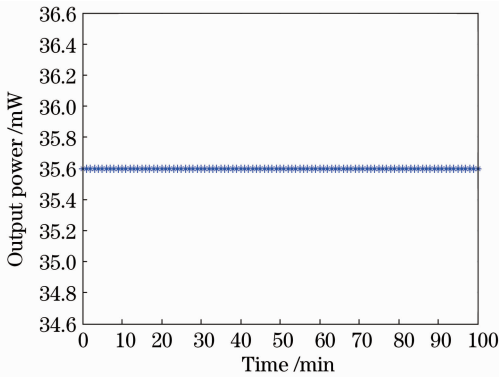


图 9 EM650 输出特性

Fig. 9 Output characteristics of EM650

此外还分别对 CQF935/5624 和 EM650 的输出光斑情况进行了简单的测试。实验中使用的一张液晶片,将液晶片用光学支架固定好,调整好 CQF935/5624 和 EM650 的输出端与液晶片的法线方向重合。分别开启二者至稳定状态进行测量,所

得测量结果如图 10 和图 11 所示,从图中看出输出的光斑呈现出高斯光束的特征。

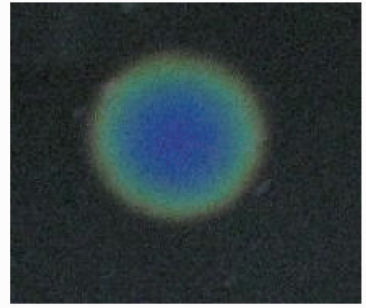


图 10 CQF935/5624 光斑

Fig. 10 Light spot of CQF935/5624

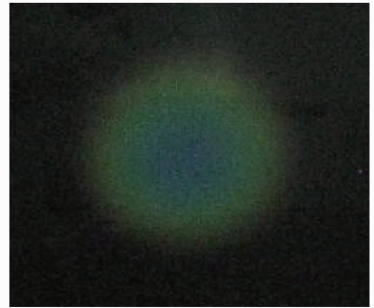


图 11 EM650 光斑

Fig. 11 Light spot of EM650

3.2 CQF935/5624“种子光”M-Z 调制性能测试

CQF935/5624“种子光”调制实验系统框图如图 12 所示。其中图 12(a)是静态调制系统框图,图 12(b)是动态调制系统框图。在室温下,零偏压下 CQF935/5624 与 M-Z 调制器耦合后输出的功率分别调谐在 4、6、8、16 mW,进行 M-Z 静态调制实验,所获得直流(DC)偏压和输出功率关系如图 13 所示。

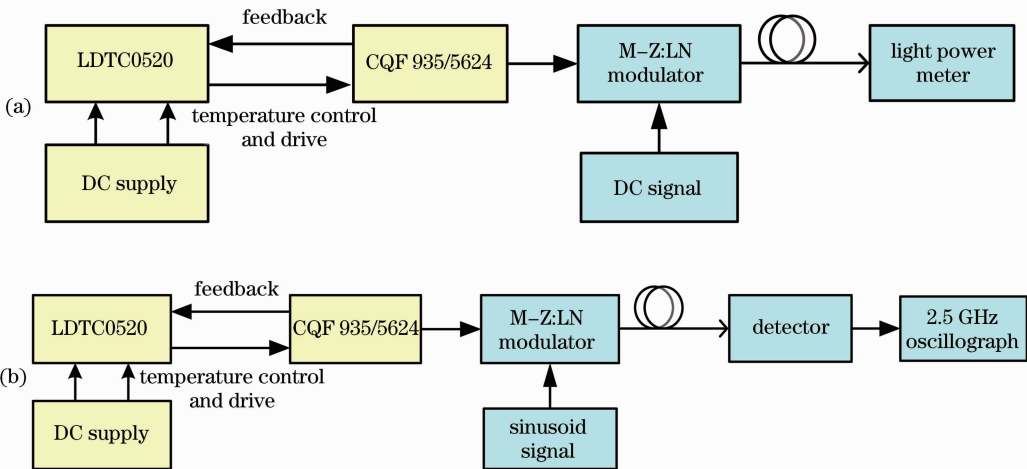


图 12 CQF935/5624“种子光”调制系统框图。(a)静态;(b)动态

Fig. 12 CQF935/5624 ‘seed light’ modulation system block diagram. (a) Static; (b) dynamic

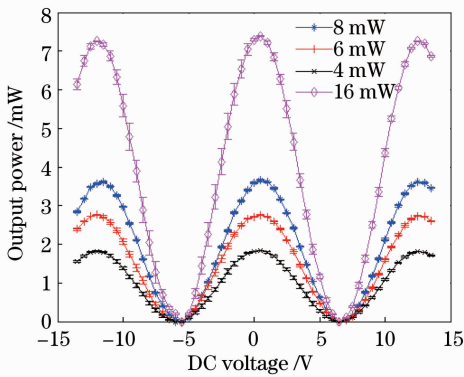


图 13 CQF935/5624 静态调制曲线

Fig. 13 Static modulation curves of CQF935/5624

静态调制结果显示, M-Z 调制器在不同 DC 偏置时呈现周期性调制, 其变化规律为正弦的平方, 与

理论结果相符。虽然调制曲线整体上是非单调的, 但在每个周期内存在单调的近线性调制区域。各输入光功率下调制的半波电压在 $6.0 \sim 6.5 \text{ V}$ 之间。M-Z 调制器的插入损耗约为 -3.2 dB 。

使用恒定频率的正弦信号进行动态调制实验。实验条件为: 室温下, 将 CQF935/5624 输出功率设定为 8 mW , 零调制偏压下的经过调制器后的输出功率大约为 3.7 mW , 可以直接使用 InGaAs 探测器探测。M-Z 调制器的 DC 偏置点设置为 $+2.5 \text{ V}$, 在此偏压下输出功率为 2.8 mW 。调制信号由 Agilent E4428C 提供, 输出一个频率为 750 MHz , 幅度为 1 V 的正弦信号进行调制。探测器输出的解调信号用 Agilent DSO90254A 型 2.5 GHz 示波器观测, 所得结果如图 14 和图 15 所示。

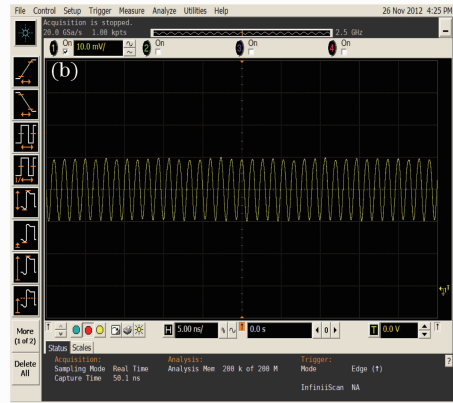
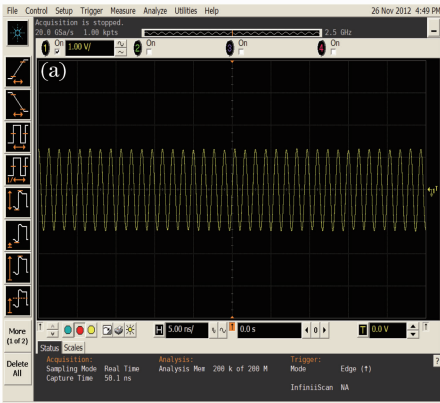


图 14 调制与解调信号时域波形

Fig. 14 Modulated and demodulated time domain waveform

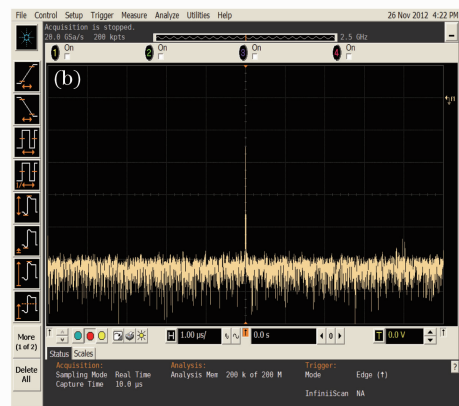
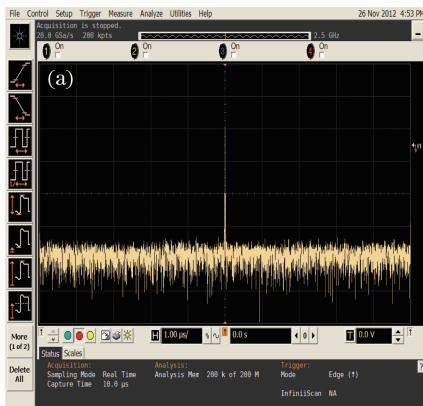


图 15 调制与解调信号频域波形

Fig. 15 Modulated and demodulated frequency domain waveform

从实验结果可以看出, 解调信号相对于调制信号只是在幅值有所衰减, 调制信号的幅值为 1 V , 解调信号的幅值为 9.68 mV 。二者时域波形基本未发生畸变。对两个波形进行快速傅里叶变换(FFT)分析, 对中心频率进行鉴频测得二者都是 750 MHz , 频域

波形也基本未发生畸变。解调信号很好地反映了调制信号的信息。

3.3 EM650“种子光”M-Z 调制性能测试

EM650“种子光”调制实验系统框图如图 16 所示, 其中图 16(a)是静态调制系统框图, 图 16(b)是

动态调制系统框图。在室温下,EM650 恒定输出 35.6 mW 的光,连接 M-Z 调制器的输入端。进行 M-Z 静态调制实验,输出端则采用 FC/APC 拔插式

光功率计进行测量。所获得直流偏压和输出功率关系如图 17 所示。

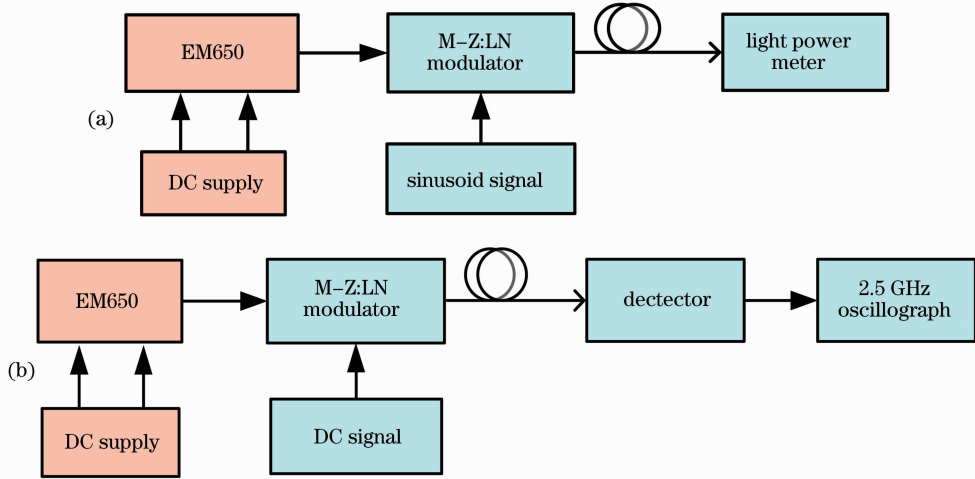


图 16 EM650“种子光”调制系统框图。(a)静态;(b)动态

Fig. 16 EM650 “seed light” modulation system block diagram. (a) Static; (b) dynamic

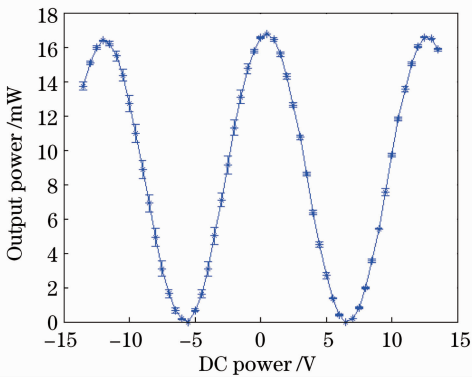


图 17 EM650 静态调制曲线

Fig. 17 Static modulation curve of EM650

静态调制结果显示, M-Z 调制器在不同 DC 偏置时呈周期性调制,其变化规律为正弦平方,与理论

结果相符。虽然调制曲线整体上是非单调的,但在每个周期内存在单调的近线性调制区域。各输入光功率下调制的半波电压在 6.0~6.5 V 之间。M-Z 调制器的插入损耗约为 -3.2 dB。所得结果与 CQF935/5624 基本一致。

使用恒定频率的正弦信号进行动态调制实验。室温下,EM650 的输出为恒定功率的 35.6 mW。M-Z 调制器的 DC 偏置点为 +4.5 V,在此偏压下输出功率为 4.5 mW,可以直接使用 InGaAs 探测器探测。调制信号由 Agilent E4428C 提供,输出一个频率为 750 MHz,幅度为 1 V 的正弦信号进行调制。探测器输出的解调信号用 Agilent DSO90254A 型 2.5 GHz 示波器观测,所得结果如图 18 和图 19 所示。

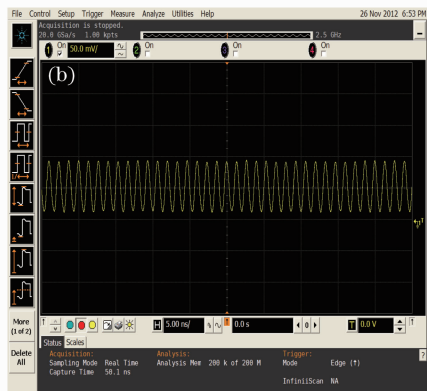
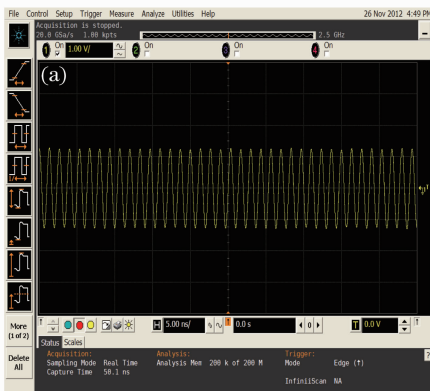


图 18 调制与解调信号时域波形

Fig. 18 Modulated and demodulated time domain waveform

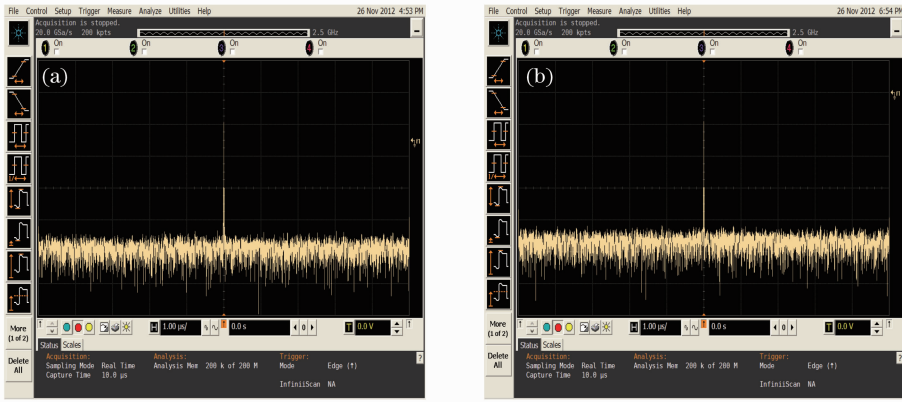


图 19 调制与解调信号频域波形

Fig. 19 Modulated and demodulated frequency domain waveform

从实验结果可以看出,解调信号相对于调制信号只是在幅值上有所衰减,调制信号的幅值为 1 V,解调信号的幅值为 40.3 mV。EM650 解调信号幅值大于 CQF935/5624 的解调信号幅值,说明探测器对 EM650 的响应度更高。二者时域波形基本未发生畸变。对两个波形进行 FFT 分析,对中心频率进行鉴频测得二者都是 750 MHz,频域波形也基本未发生畸变。解调信号很好地反映了调制信号的信息。

此外,分别使用频率为 250、375、500、625 MHz 的正弦调制信号对二者进行了大量的调制实验,所得的结果与 750 MHz 的结果类似,在此限于篇幅未给出实验结果。大量实验结果表明,调制过程引入

的失真很小,调制信号和解调信号无论是在时域上还是在频域上都显示了极高的相似性,呈现出良好的调制性能。

3.4 “种子光”调制畸变情况测试

由于 M-Z 调制器的调制曲线是正弦的平方,在调制曲线的峰值和谷值附近是调制的非线性区域,如果静态工作点设置在该非线性区域,解调信号会发生畸变。在实验过程之中,将 CQF935/5624 和 EM650 的直流偏压均设置为 6.0 V。按照之前测得的静态调制曲线,将进入调制的非线性区域,解调波形会发生畸变。图 20 为二者产生畸变的测试结果。

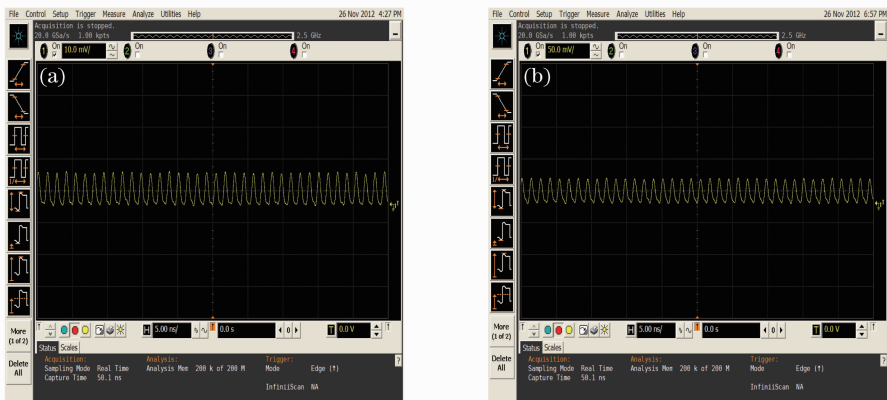


图 20 调制非线性区的畸变图。(a) CQF935/5624; (b) EM650

Fig. 20 Distortion diagram in nonlinear modulation area. (a) CQF935/5624; (b) EM650

可以看到,当进入调制非线性区之后,解调波形确实发生了畸变,和调制信号波形相比有较大的区别。所以在实验过程之中,要把静态工作点设置在调制线性区之内;而且要稳定静态工作点,防止其由于温度和环境的进入调制的非线性区之中。

4 结 论

对相关器件 CQF935/5624、EM650 的输出特性进行了实验测试,并给出了实际光斑的观测结果。对给出的两种“种子光”光源的调制性能进行了大量的静态调制实验和动态调制实验研究。通过对调制

信号和解调信号的时域和频域的对比,可以看出两种“种子光”光源都有很好的调制性能。从器件的小型化和使用的方便性方面考虑,集成化的 EM650 模块具有更大的优势,有望在实际的 FM-CW 激光雷达发射源系统中获得进一步应用。

参 考 文 献

- 1 Barry Stann, William Ruff, Zoltan Sztankay. A practical low-cost high-range-resolution lidar[C]. *SPIE*, 1995, **2472**: 118~129
- 2 Barry Stann, William Ruff, Zoltan Sztankay. Intensity-modulated diode laser radar using frequency-modulation/continuous-wave ranging techniques[J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(11): 3270~3278
- 3 Barry Stann, Mark Giza, Dale Robinson *et al.*. A scannerless imaging lidar using a laser diode illuminator and FM-CW radar principles[C]. *SPIE*, 1999, **3707**: 421~431
- 4 Brian Redman, Barry Stann, William Ruff *et al.*. Anti-ship missile tracking with a chirped amplitude modulation lidar[C]. *SPIE*, 2004, **5413**: 113~124
- 5 Brian Redman, William Ruff, Mark Giza *et al.*. Anti-ship missile tracking with a chirped AM lidar-update: design, model predictions and experimental results[C]. *SPIE*, 2005, **5791**: 330~340
- 6 Brian Redman, Barry Stann, William Lawler *et al.*. Chirped AM lidar for anti-ship missile tracking and force protection 3D imaging: update[C]. *SPIE*, 2006, **6214**: 621400
- 7 E. J. Bochove. Theory of spectral beam combining of fiber lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 2002, **38**(5): 432~444
- 8 S. J. Augst, A. K. Goyal, R. L. Agarwal *et al.*. Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers in a MOPA configuration lasers and electro-optics CLEO'02, long beach[J]. *IEEE Laser and Electro-Optics Society*, 2002, **1**: 594~595
- 9 S. J. Chang, C. L. Tsai, Y. B. Lin *et al.*. Improved electro-optic modulator with ridge structure in X-Cut LiNbO₃ [J]. *Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5): 843~847
- 10 K. Noguchi, H. Miyazawa, O. Mitomi. 75 GHz broadband Ti:LiNbO₃ optical modulator with ridge structure[J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(12): 949~951
- 11 Wang Zhi, Zhang Jinlei, Meng Qinwen. Effect of the electrodes in an electro-optic polymer modulator on waveguide characteristics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 379~382
王 智, 张金磊, 孟庆文. 光纤聚合物电光调制器电极对波导特性的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 379~382
- 12 Liu Guoli, Wang Wei, Xu Guoyang *et al.*. Monolithic integrated single ridge stripe electro absorption modulated DFB lasers using selective area LP-MOVPE[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(4): 321~324
刘国利, 王 圩, 许国阳等. 选区外延制作单片集成单脊条形电吸收调制DFB激光器[J]. *中国激光*, 2001, **28**(4): 321~32
- 13 Liu Zilong, Zhu Daqing. Electro-optic polymer modulators modulated only in cladding and its theoretical analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1516~1520
刘子龙, 朱大庆. 包层调制的聚合物电光调制器及其理论分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1516~1520
- 14 Hou Guanghui, Wen Jimin, Huang Hengpei *et al.*. High frequency characterization measurement of electroabsorption modulated-integrated distributed-feedback laser module [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1427~1430
侯广辉, 温继敏, 黄亨沛等. 电吸收调制激光器集成芯片的高频测试[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1427~1430
- 15 Jiang Peng, Lu Wei, Wang Qi *et al.*. High-power laser modulation technique for FM-CW imaging radar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 18~23
姜 鹏, 陆 威, 王 骐等. 用于调频/连续波激光成像雷达的高功率激光调制技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 18~23
- 16 Deng Chen, Zhao Jiguang, Du Xiaoping *et al.*. Transmitting power of FM-CW lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 304~307
邓 陈, 赵继广, 杜小平等. FM-CW 激光雷达发射功率的研究[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(2): 304~307
- 17 Gu Wanyi, Li Guorui. Fiber Optic Communications Systems [M]. Beijing: Beijing University Posts and Telecommunications Press, 1999. 129~135
顾婉仪, 李国瑞. 光纤通信系统[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 1999. 129~135
- 18 Chen Caihe. Fiber Optic Communications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 228~240
陈才和. 光纤通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 228~240

栏目编辑: 宋梅梅