

# 线性调频 CO<sub>2</sub> 激光的脉冲压缩

曾昭信 史双瑾

(电子科技大学光电子技术系, 成都 610054)

**提要** 报道了用声光调制器对 CO<sub>2</sub> 激光进行线性调频, 调频光信号通过光学自差检测再用声表面波色散延迟线压缩, 得到的压缩脉宽达 80 ns, 脉冲压缩比为 100。还对实验系统和结果作了分析和讨论。

**关键词** LFM, CO<sub>2</sub> 激光器, 脉冲压缩

## 1 引言

线性调频脉冲压缩简称 LFM/PC, 是雷达的一种重要的工作体制, 它是对低功率连续波辐射源进行线性频率调制, 发射出宽频带长持续时间的调频脉冲, 在接收端通过脉冲压缩技术而获得时域上的窄脉冲, 这种技术用于雷达, 既增大了雷达的探测能力又能提高系统的距离分辨力, 解决了单纯的时域脉冲在提高探测距离与距离分辨力间的矛盾。

采用脉冲积垒技术的 LFM/PC CO<sub>2</sub> 激光测距机, 只需几瓦的激光功率测距距离可达 7 km<sup>[1]</sup>。LFM/PC CO<sub>2</sub> 激光雷达, 国外也报道过多个系统<sup>[2,3,5]</sup>。线性调频信号加载到激光上通常有两种方法, 一种是激光器的腔外加声光调制器, 另一种是在激光器腔内插入 FM 切割的电光调制器。前者的调制带宽和衍射效率受声光器件的性能限制, 光路准直调整较麻烦, 后者的调制带宽更宽, 但是电光调制器的调制电压较高, 调制器放入腔内工艺上较难, 光信号的探测也要采用光外差方式。本文的实验系统用声光调制方式。

## 2 线性调频与脉冲压缩

一个窄的电脉冲激励声表面波色散延迟线能得到一个展宽的线性调频波。声表面波 (SAW) 色散延迟线的脉冲响应设计为:

$$h(t) = \text{rect} \frac{t}{T} e^{j2\pi(f_0 t - \frac{1}{2} K t^2)} \quad (1)$$

式中  $T$  是延迟线的色散延迟时间;  $f_0$  是中心频率;  $\Delta f$  是调频带宽;  $K = \Delta f/T$  是调频斜率,  $K$  为正表示高频较低频延迟长,  $K$  为负则相反;  $\text{rect}(t/T)$  是矩形函数。

窄的电脉冲  $\delta(t)$  激励延迟线, 其输出

$$S_i(t) = h(t) * \delta(t) = h(t) \quad (2)$$

(2) 式表示含有各种频率成份的  $\delta(t)$ , 在延迟线带宽  $\Delta f$  内, 延迟时间  $T$  里得到不同的延迟量, 而在延迟线的输出端获得一线性调频信号。此信号经整形、放大后驱动声光调制器, 在声光介质内形成被调制的超声波, 声子与光子碰撞交换动量与能量。以布喇格角入射的频率为  $\nu_0$  的入射光满足动量守恒条件具有高的衍射效率, 出射光波就只有零级和正一级衍射光或负一级衍射光。从满足能量守恒条件可以得出只有衍射光的频率  $\nu(t)$  才受到频率调制

$$\nu(t) = \nu_0 + (f_0 - \frac{1}{2}Kt) \tag{3}$$

光的相干检测可以把调频光波的  $S_i(t)$  解调出来, 送  $S_i(t)$  到一个匹配滤波器进行脉冲压缩, 这个匹配滤波器也是一块声表面波色散延迟线称为 SAW 压缩器, 它是与前述的起频率展宽作用的 SAW 展宽器有同样  $T, f_0, \Delta f$  的延迟线, 仅是具有相反的调制斜率。压缩脉冲  $S_o(t)$  是输入信号与 SAW 压缩器的脉冲响应  $h'(t)$  的卷积

$$h'(t) = AS_i(-t) \tag{4}$$

其中  $A$  是一个常数, 所以

$$S_o(t) = S_i(t) * h'(t) = A \int_{-\infty}^{\infty} S_i(x)h'(t-x)dx \tag{5}$$

将  $S_i(t)$  和  $h'(t)$  值代入

$$S_o(t) = A \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \frac{x}{T} e^{j2\pi(f_0 x - \frac{1}{2}Kx^2)} \cdot \text{rect} \frac{t-x}{T} e^{j2\pi[f_0(x-t) - \frac{1}{2}K(x-t)^2]} dx \tag{6}$$

此积分可以分两段积出, 积分限以  $t \geq 0$  和  $t < 0$  为界, 再考虑到  $f_0$  的频率很高, 其倍频可以通过滤波器去掉而不予考虑, 经演算最后结果

$$S_o(t) = AT(1 - \frac{|t|}{T}) \sin K T t (1 - \frac{|t|}{T}) e^{2\pi f_0 t} \tag{7}$$

当  $t \leq T$  时,  $S_o(t)$  的包络近似为辛格函数  $AT \text{sinc} K T t$ , 它的第一旁瓣幅值与主瓣幅值之比为  $-13.5 \text{ dB}$ , 在  $K T t = 1/2$  时,  $\sin K T t = 2/\pi$  接近主瓣幅值的  $-4 \text{ dB}$ , 此处包络的宽度定义为压缩脉冲的宽度  $\tau = 2t$ , 所以

$$\tau = 1/\Delta f \tag{8}$$

脉冲压缩比

$$T/\tau = T \cdot \Delta f \tag{9}$$

SAW 色散延迟线展宽的线性频率调制信号和被压缩了的脉冲如图 1 所示。

### 3 实验系统和结果

用锗声光调制器对  $\text{CO}_2$  激光腔外线性调频, 声光调制器驱动源电功率  $17\text{W}$  时, 在调制带宽  $70 \sim 90 \text{ MHz}$  范围内声光调制器有  $50\%$  的衍射效率  $\eta$ , 如图 2 所示。

实验系统采用自差光路如图 3, 分束镜  $M_1$  分一束光到  $M_2$  用作本振光束, 分出的另一光束

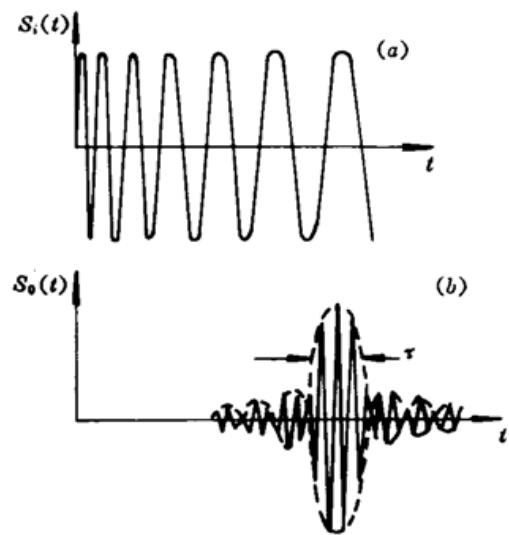


Fig. 1

- (a) linear FM wave of a negative modulation slope
- (b) wave of the compressed pulse with a matched filter

经声光调制器衍射作为信号光。透镜  $L_1$  的作用是聚焦入射光到声光介质的中心以缩短超声波通过光束的渡越时间,提高声光调制频率。声光调制器后面的挡板用于挡住零级光,仅让载有调频信号的一级光通过。

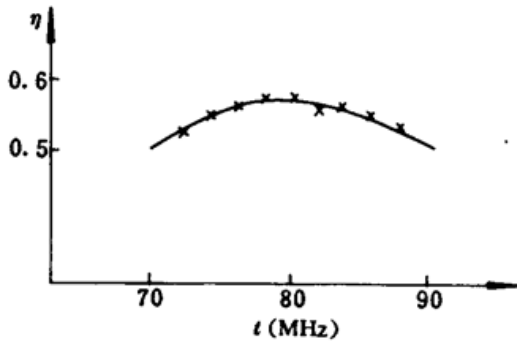


Fig. 2 Frequency characteristic of the acousto-optic modulator. Driving power is 17 W

声光调制器的光路按图 4 布置,透镜  $L_1$  调整到入射光的  $\alpha$  角等于布喇格角  $\theta_B$  并且使入射光在声光介质中心聚焦

$$\sin\theta_B \approx \frac{\lambda}{2\lambda_s} \tag{10}$$

式中  $\lambda$  与  $\lambda_s$  分别是激光与超声波在锗晶体中的波长,在 80 MHz 调制时,算得  $\theta_B = 1.23^\circ$ ,正一级衍射光与法线的夹角

$$\alpha = \theta_B \approx \frac{\lambda}{2\lambda_s} \tag{11}$$

激光再由声光介质到空气遵守折射定律  $n\sin\alpha = \sin\beta$ ,锗的折射率  $n = 4$ ,算得  $\beta = 4.92^\circ$ 。当调制频率变化时衍射角跟随变化,由(10), (11)式可得

$$\Delta\alpha = \frac{-\lambda}{2\lambda_s^2 \cos\alpha} \Delta\lambda_s \tag{12}$$

而折射角的变化满足下面关系

$$n\sin(\alpha + \Delta\alpha) = \sin(\beta + \Delta\beta)$$

调制频率由 70 MHz 变到 90 MHz,可求出  $\Delta\alpha = 0.31^\circ, \Delta\beta = 1.25^\circ$ ,因此在远距离不同频率的衍射光束将有很大的位移。 $L_2$  的作用是准直出射光束,采用 70 mm 的焦距,调制频率由 70~90 MHz,出射光束仅平移 1.53 mm,比光束的直径 5 mm 小得多,在光束最大平移 1.53 mm 时,光斑仍有 62% 的重叠区域。

声表面波展宽器与压缩器的基片是石英片,它上面光刻有金属化叉指换能器。设计展宽器的中心频率  $f_c = 80$  MHz,带宽  $\Delta f = 20$  MHz,调频脉冲宽度  $T = 8 \mu s$ ,展宽器具有负的调频斜率,压缩器调频斜率为正,它对信号的插损 40 dB,理想情况由(8), (9)式可得  $\tau = 50$  ns,  $T/\tau = 160$ ,但是压缩后的时间旁瓣太大,用于激光雷达上它对弱的回波信号形成干扰,因而 SAW 压缩器用了海明加权,主旁瓣比达到 32 dB,但是加权降低了压缩器的相关增益还使压缩脉冲

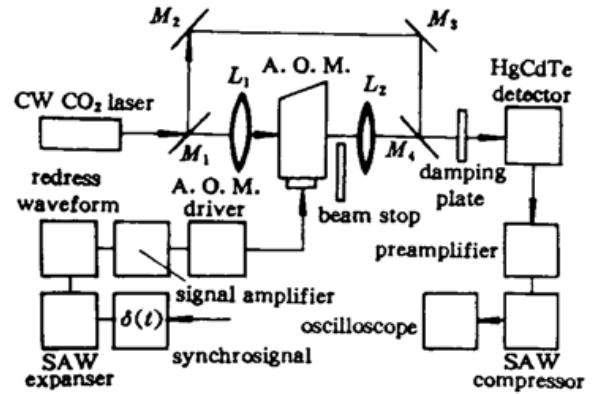


Fig. 3 Block diagram of the CO<sub>2</sub> laser LFM pulse compression experiment

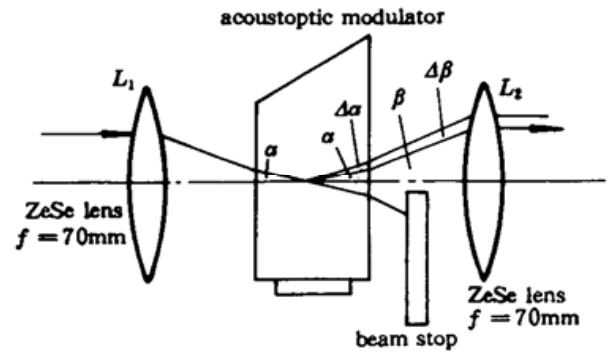


Fig. 4 Diagram of the acousto-optic modulator

加宽, 实测  $\tau = 80 \text{ ns}$ ,  $T/\tau = 100$ 。脉冲压缩比为 100, 从激光雷达接收能量的观点看, 发射 10 W 的线性调频激光相当于 1000 W 的时域脉冲发射, 实验的线性调频脉冲重复频率是 25 kHz。图 5 是示波器显示的 HgCdTe 探测器混频光信号后检测到的线性调频波形及压缩脉冲波形。

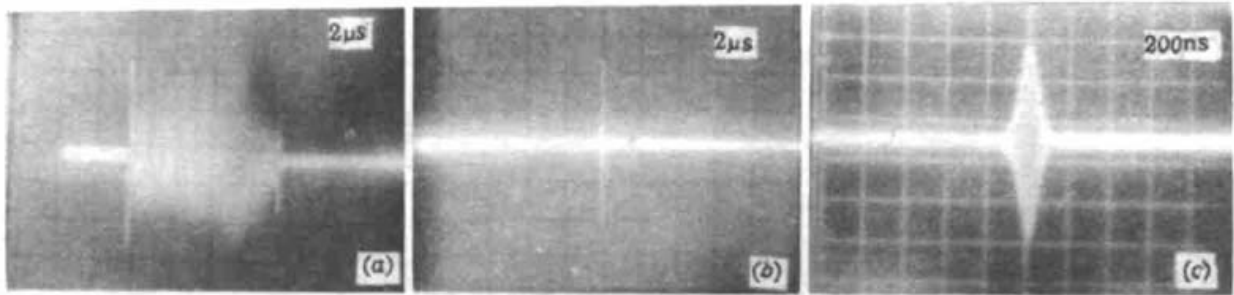


Fig. 5 Waveform photograph

(a) waveform of the chirp; (b) compressed pulse derived from the weighted chirp with (a) sweep time; (c) compressed pulse, but the sweep time is ten times as quick as (b)

## 4 结束语

此实验系统已用于  $\text{CO}_2$  LFM/PC 激光成像雷达上, 由于用了线性调频脉冲压缩技术, 它具有脉冲体制的优点, 很容易获得目标的距离信息, 又因为采用了声光调制器调频, 调频的重复频率高, 因而使该激光雷达实现了 1 帧/s 的成像速率, 每帧像素  $200 \times 100$ , 成出了探测目标的强度像、距离像和距离选通像。采用了线性调频脉冲压缩技术, 在我们的  $\text{CO}_2$  激光成像雷达降低了脉冲体制使用 Q 开关  $\text{CO}_2$  激光器<sup>[4]</sup>制造上的难度, 我们用石英壳的一般  $\text{CO}_2$  激光器, 在输出功率仅为 4.8 W 的情况下, 成像距离超过了 3 km, 还探测到 5.4 km 远的散射目标信号。为提高激光雷达的探测能力和距离分辨力, 应增大线性调频脉宽  $T$  和带宽  $\Delta f$ , 前者受限于调频的重复频率, 后者受限于声光调制器的带宽, 声光调制器的带宽做到 30 MHz 已是相当困难, 用 CdTe 电光调制器在波导  $\text{CO}_2$  激光器腔内调频, 调频带宽已做到 95 MHz, 压缩脉宽达到 15 ns<sup>[5]</sup>。

调制频率变化使得经过声光调制器的衍射光束的角度变化也可以采用双声光调制器把衍射光束的角度变化转换为一个微小的平移量<sup>[6]</sup>, 此法光路调整简便, 但是入射光要经两次衍射, 总的衍射效率更低。

**致谢** 本实验的声光调制器及声表面波色散延迟线由 1426 所提供。

## 参 考 文 献

- 1 K. F. Hulme. Advanced  $\text{CO}_2$  laser rangefinders. *Optics and laser technology*. August 1982. 213~215
- 2 B. Stephan, P. Metivier. Flight evaluation trials of heterodyne  $\text{CO}_2$  laser radar. *SPIE*, 1987, 806: 110~118
- 3 J. L. Meyzonnette, B. Remy, G. Saccomani. Imaging  $\text{CO}_2$  laser radar with chirp pulse compression. *SPIE*, 1987, 783: 169~179
- 4 N. J. D. Martin. A laser radar for the detection of Cables and other hazardous obstracles. *Proceeding of CIE 1991 International Conference of Radar*. 84~87
- 5 D. M. Henderson, M. J. Halmos, R. L. Duvall. Pulse compression of an FM chirped  $\text{CO}_2$  laser. *SPIE*, 1989, 1181: 152~162
- 6 S. S. Eucker, M. L. Fleshner. Imaging three-frequency  $\text{CO}_2$  laser radar. *SPIE*, 1989, 1103: 159~164.



## LFM Pulse Compression of a CO<sub>2</sub> Laser

Zeng Zhaoxin Shi Shuangjin

(Dept. of Opto-Electronics Technology, UEST of China, Chengdu 610054)

**Abstract** This paper describes a linear FM of a CO<sub>2</sub> laser with an acoustooptic modulator. The chirp signal is detected with an optical autodyne and compressed with a SAW dispersive delay line. The compressed pulse width is 80 ns and its compression ratio is 100. The experimental system and results are also analysed and discussed.

**Key words** LFM, CO<sub>2</sub> laser, pulse compression

\*\*\*\*\*

## 500 W 旋转开关准分子激光器

黑龙江省牡丹江市光电技术研究所用了两年多的时间研制出 EMJ-500 准分子激光器, 经中国计量科学院测试, 其激光气体为 XeCl, 激光波长为 308 nm, 最大激光功率为 518 W, 单脉冲能量为 0.9 J, 重复频率为 600 Hz, 功率不稳定性为 ±3%, 激光光斑为 40×32 mm, 发散角为 1×2.5 mrad, 激光脉宽为 25 ns, 一次充气寿命大于 5×10<sup>6</sup> 次。

1996 年 7 月 12 日, 在牡丹江市通过了国家验收和黑龙江省成果鉴定。该激光器的最高输出功率可达 518 W, 已经步入国际准分子激光器 90 年代的先进行列, 并将可控旋转开关技术成功地应用于高重复频率准分子激光器, 解决了高功率准分子激光器的关键技术。

(牡丹江光电技术研究所 申家镜 1996 年 9 月 20 日收稿)