

脉冲压缩 CO₂ 相干激光雷达信号处理的研究

蔡喜平 赵远 孙东松 戴永江 肖泉

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

提要 提出了采用快速傅里叶变换(FFT)及快速傅里叶逆变换(IFFT)变换对脉冲压缩 CO₂ 相干激光雷达信号处理, 并进行了理论与计算机模拟研究。通过运行所研究的信号处理程序包表明, 采用这种方法可以很好地完成信号处理(脉冲压缩)任务, 并可准确地提出所需要测量的时间延迟参数。

关键词 激光雷达, 脉冲压缩, 信号处理, 快速傅里叶变换, 匹配滤波

1 引言

激光雷达是雷达技术与光电技术结合的产物。CO₂ 相干激光雷达是一种真正的雷达系统, 它使用普通雷达的结构、波形和信号处理技术, 它的性能在很多方面优于普通雷达^[1]。但是由于波长的不同, 使得在信号处理的发射、传输、接收及处理方面产生了质的变化。CO₂ 相干激光雷达系统具有非常高的速率特点, 这个系统将可能使信号处理电子部件达到极限。因此在 CO₂ 相干激光雷达的研究中, 信号的发射与接收、信号的处理等工作尤为重要。

CO₂ 相干激光雷达的总体设计首先要考虑的重要内容之一就是体制的选择, 而体制的选择是和信号的形式密切相关的。目前可选用的信号形式主要有三种: 窄脉冲、脉冲压缩、调频连续波。脉冲压缩 CO₂ 相干激光雷达指发射波形是一个宽脉冲线性调频信号, 而接收到的信号波形仍然是一个宽脉冲线性调频信号, 此被接收到的信号经过压缩, 可达到较高的时间延迟测量精度。脉冲压缩 CO₂ 相干激光雷达与其它两种信号形式的雷达相比较, 有良好的距离分辨率和径向速度分辨率, 实现也比较容易; 另外因为所发射的宽脉冲线性调频信号既有较大的时宽, 又有较大的带宽, 因此它的作用距离较远, 测距、测速精度都较高, 成像速率也较高^[2,3]。所以从测距、测速精度、作用距离、成像速率等方面考虑, 脉冲压缩体制的 CO₂ 相干激光雷达应该是最佳选择。

2 匹配滤波(脉冲压缩)的实现

匹配滤波器是压缩回波信号的关键性部件, 它的性能影响整个雷达的工作指标。就当前的发展来看, 比较合适的匹配滤波器实现方法有两种: 模拟的, 采用声表面波器件; 数字的, 主要是采用快速傅里叶变换算法组成滤波器^[4]。

声表面波器件是六十年代发展起来的一种时延器件, 这种器件体积小, 价格便宜, 技术较

成熟,是国外目前普遍采用的匹配滤波器件。数字式匹配滤波器也是在六十年代发展起来的,受数字器件集成技术的限制,一直未用于 CO₂ 相干激光雷达的研究中。近几年,随着集成技术及计算机技术的高速发展,采用数字滤波器已经成为可能。

和模拟式滤波器相比,数字式滤波器具有下述优点^[5]:(1) 在性能上可以达到设计需要的稳定度;(2) 不存在阻抗匹配问题,这在模拟滤波器中是一个很重要的问题;(3) 临界频率的确定没有严格限制;(4) 滤波器的分数改变方便,具有较大的灵活性,可以任意改变时宽带宽,任意控制处理误差;(5) 经模数转换处理后,可以将处理后的数据存储在存储器中,并且可以进行非实时处理。

利用数字技术进行脉冲压缩主要是利用快速傅里叶变换(FFT)及快速傅里叶逆变换(IFFT)对,可采用硬件来实现,也可采用软件(编程)技术实现。硬件处理速度快,但成本很高。用软件技术来处理则具有成本低,实现容易,不过分依赖硬件,并能实现距离、速度及轮廓像的实时或非实时视频显示等优点。本文进行了用软件技术实现脉冲压缩的研究。

3 理论研究

3.1 脉冲压缩 CO₂ 相干激光雷达

图 1 是脉冲压缩 CO₂ 相干激光雷达的原理框图。

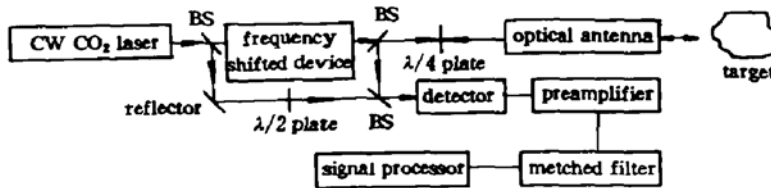


图 1 采用脉冲压缩体制的 CO₂ 相干激光雷达原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of the CO₂ coherent laser radar with a pulse compressed system

连续波 CO₂ 激光器发出未调制的激光光波,经分束器后分为两束,一束作为本振光,频率为 f_0 ,另一束作为信号光,经移频器后产生宽脉冲线性调频信号,中心频率为 f_0 ,经光学天线发射至目标,从目标上反射回的信号光经光学天线再经反射进入混频器(HgCdTe 探测器)与本振光混频,经前置放大后送入匹配滤波器进行处理。

3.2 脉冲压缩

CW CO₂ 激光器所发出的光波可表示为

$$\psi_L(t) = a(t)\exp(j2\pi f_0 t) \quad (1)$$

$a(t)$ 为信号的复振幅。此光波经移频器后变为

$$\psi_s(t) = a(t)\exp[j(2\pi f_0 t + \pi k t^2)] \quad (2)$$

式中, k 为调制斜率。信号回波 $\psi_R(t)$ 与本振光波在探测器表面相干混频,探测器的输出为

$$I(t) = |\psi_L(t) + \psi_R(t)|^2 = |\psi_L(t) + \psi_s(t - t_r)|^2 \quad (3)$$

式中, t_r 为信号往返延迟时间。此信号经前置放大器后,其直流分量将被滤掉,因此中频信号表示为

$$i_{IF} = 2V \cdot |a(t)|^2 \cdot \cos(2\pi f_0 t - \pi k t^2 + 2\pi f_0 t_r) + u(t) \quad (4)$$

其中, $V = \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \right]^{1/2} G \sqrt{\sigma}$, 它主要受目标散射特性、大气湍流等因素的影响。 λ 为光波波长, r 为雷达至目标的距离, G 为光学天线增益, σ 为目标的雷达有效截面, f_d 为多普勒频移, $n(t)$ 为噪声。

匹配滤波器的冲激响应函数可表示为

$$h(t) = 2\sqrt{k} \cos(\pi k t^2) \quad -t_p/2 \leq t \leq t_p/2 \quad (5)$$

其中 t_p 为脉冲宽度。则匹配滤波器的输出为

$$g(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t) \cdot h(\tau - t) dt = V\sqrt{k} |a(t)|^2 \cdot \cos(\pi f_d \tau + 2\pi f_d t_p) \frac{\sin[\pi(f_d - k\tau)(t_p - |\tau|)]}{\pi(f_d - k\tau)} + G_N(\tau) \quad (6)$$

当 $\tau \ll t_p$ 时, (6) 式可以改写为

$$g(\tau, f_d) = V\sqrt{k} |a(t)|^2 \cdot \cos(\pi f_d \tau + 2\pi f_d t_p) \frac{\sin[\pi(f_d - k\tau)t_p]}{\pi(f_d - k\tau)} + G_N(\tau) \quad (7)$$

当 $n(t) = 0$ 时, 即不存在噪声时, 由(7)式可以得出下述结论:

(1) 当 τ 值很小时, 或者说当 $\tau \ll t_p$ 时, $g(\tau, f_d)$ 的最大值可以认为是发生在 $f_d - k\tau = 0$ 处, 此时 $\tau = \tau_0$, 则

$$\tau_0 = \frac{f_d}{k} \quad (8)$$

(2) 当 $f_d = 0$ 时, 匹配滤波器的输出为

$$g(\tau) = V\sqrt{k} |a(t)|^2 \cdot \frac{\sin[\pi k \tau(t_p - |\tau|)]}{\pi k \tau} \quad (9)$$

$g(\tau)$ 的最大值发生在 $\tau = 0$ 处, 而且对 $\tau = 0$ 为对称的。

(3) 当 $f_d \neq 0$, $g(\tau, f_d)$ 的最大值在时间上也有偏移, 幅度也将变小, 因为

$$|k| = \frac{\Delta f}{t_p} \quad (10)$$

所以, (10) 式中的 τ_0 , 即 $g(\tau, f_d)$ 为极大的 τ 值为

$$\tau_0 = \pm \frac{f_d}{\Delta f} \cdot t_p \quad (11)$$

式中, Δf 为信号带宽。

当 $n(t) \neq 0$ 时, 测量结果存在误差, 误差大小与噪声功率谱密度的二分之一次方成正比, 与前置放大带宽成反比。

4 脉冲压缩的实现及计算机模拟

4.1 脉冲压缩的实现

脉冲压缩的目的就是利用匹配滤波器将宽脉冲压缩, 以高精度给出所要测量的信号延迟时间。图 2 是所设计的利用 FFT 及 IFFT 变换对的数字式匹配滤波器。

外差信号经过放大和模数转换(A/D)后输入计算机, 经 FFT 后, 变成信号的离散频谱。脉冲压缩的过程, 在频域来说, 就是改变信号频谱的过程。根据压缩后所需要的频谱, 对信号频谱进行加权, 也就是改变各个频率分量的振幅和相位, 然后通过反变换, 就可以得到压缩后的波

形。根据最大似然估值理论, 找出 $g(\tau)$ 最大值的位置就是所要测量的时间延迟值 t_r 。

4.2 计算机模拟

利用 C 语言编制了脉冲压缩软件包, 并通过计算机模拟实验对此进行了检验。结果如下:

(1) 用 FFT 及 IFFT 变换对实现脉冲压缩。图 2 利用 FFT 及 IFFT 变换对的数字式匹配滤波器图 3 是输入带宽为 20 MHz, 时宽为 0.2 μ s, 幅度为 10 mV 的信号经脉冲压缩后的波形。结果表明, 运用 FFT 及 IFFT 变换对可以很好地实现线性调频信号的脉冲压缩作用。

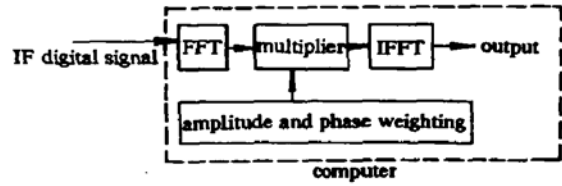


Fig. 2 Digital matched filter with FFT and IFFT transfer pairs

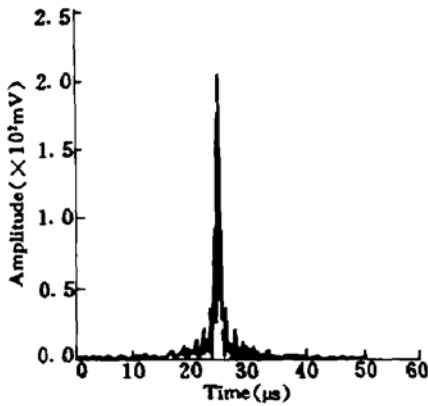


图 3 经 FFT 及 IFFT 变换对压缩后的波形
Fig. 3 Compressed waveform with FFT and IFFT pairs

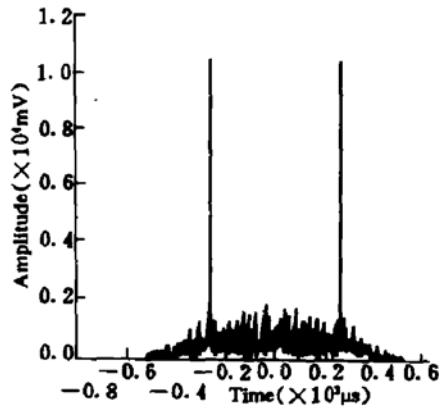


图 4 $f_d = 50$ MHz 时的输出波形
Fig. 4 Output waveform when $f_d = 50$ MHz

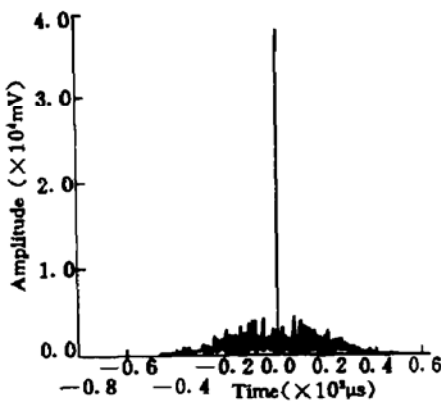


图 5 当噪声为零时的输出波形
Fig. 5 Output waveform when noise is not existing

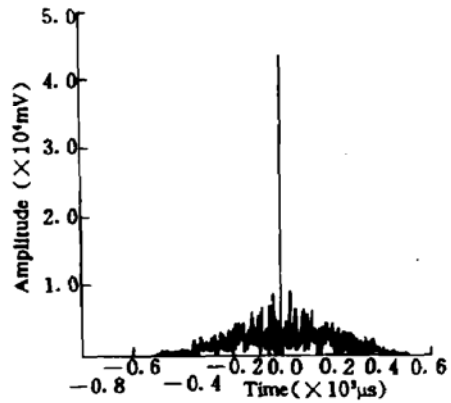


图 6 同一情况下存在白噪声时的输出波形
Fig. 6 Output waveform when noise is existing in the otherwise same condition as in Fig. 5

(2) 考虑了多普勒频移的影响。当多普勒频移不为零时, 所探测到的波形将会发生变化, 即在时间上发生平移, 幅度也将降低。对同一发射信号, 目标运动速度越快, 即多普勒频移越大, 测量误差就越大, 因此脉冲压缩体制更适用于低速运动目标和静止目标的测量。图 4 是 f_d

≈ 50 MHz 时的输出波形,可以看出,当 $f_d \neq 0$ 时,会对称地出现两个最大脉冲尖峰,这与(11)式是一致的。

(3) 采用匹配滤波的方法可以最大限度地改善输出信噪比,是提高输出信噪比的最佳途径。一般情况下,压缩比 X 即输入信号宽度 t_i 与输出信号宽度 τ_i 之比很容易达到很大(几百以上),输出信噪比将是输入信噪比的 $2X$ 倍,因此最低输入信噪比应该达到 $1/2X$ 时,才不至于使压缩后信号失去使用价值。通过对不同时宽、不同带宽时存在噪声与不存在噪声的输出波形比较,得到当噪声为白噪声时,对时间延迟并不产生影响,只是对信号的幅度有影响,这是与理论相一致的。图 5 与图 6 是存在噪声与不存在噪声时的输出波形。

(4) 距离的测量。表 1 是不同时宽、带宽、距离处的测距模拟结果,可以看出,模拟结果是成功的,利用这种方法测距是完全可行的。

表 1 测距模拟结果

Table 1 Simulated results for range determination

signals time-width (s)	signals bandwidth (MHz)	number of sample	actual range (km)	simulated result (km)
20	20	2048	5	4.926688
20	20	2048	7	7.067450
20	20	2048	10	10.000002
20	20	2048	15	14.926688
20	20	2048	20	19.853374
20	20	2048	10	10.073312
20	20	2048	10	9.794724
20	20	2048	10	10.000002
20	20	2048	10	10.000002

参 考 文 献

- 1 R. C. Harney. Military applications of coherent infrared radar. *SPIE*, 1981, 300: 1~11
- 2 J. Dansanc, J. L. Meyzonnette. CO₂ laser Doppler rangefinder with heterodyne detection and linear frequency pulse compression. *SPIE*, 1987, 806: 122~127
- 3 曾朝信. 激光雷达技术. 1995. (6): 15~22
- 4 蔡希尧. 雷达系统概论. 北京: 科学出版社, 1983. 390~393
- 5 希尔曼. B. H. 曼若斯. 雷达信息处理的理论与技术. 北京: 科学出版社, 1987. 165~212

Research on Signal Processing for the Pulse Compressed CO₂ Coherent Laser Radar

Cai Xiping Zhao Yuan Sun Dongsong Dai Yongjiang Xiao Quan
(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract A method to process signal of a CO₂ coherent laser radar by FFT and IFFT pair is presented, and the theoretical and simulation researches are proceeded. The running of the worked out signal processing packet indicates that the signal processing can be completed perfectly, and the time-delay parameter can be extracted precisely by the method.

Key words laser radar, pulse compression, signal processing, FFT (fast Fourier transfer), matched filter