

# CO<sub>2</sub>激光非线性四频外差探测的实验研究

赵 霞

(中国矿业大学 北京研究生部)

戴永江 吕跃广 皮名嘉

(哈尔滨工业大学 应用物理系)

## 提 要

本文从理论上对已提出的四频外差探测技术作了阐述,并在实验上实现了非线性四频外差探测,得到了预期的结果。

平方律放大器件是四频外差系统电信号处理的关键器件,本文对其原理作了叙述,并依此制成了一实用的器件用于本实验。

关键词: 激光雷达; 外差探测。

## 一、引 言

在几十年的时间里,外差探测技术有了飞速的发展,人们先后提出了三频外差、四频外差及自差探测方法等<sup>[2~4]</sup>。理论推导可知,由于三频外差探测系统丢失了来自目标的多普勒信息,因而无法对目标的速度进行测量,为此人们提出了基于三频外差探测的非线性四频外差探测理论。它除了可以保留来自目标的速度信息之外,也具有较高的探测灵敏度。

本文首先从理论上对已提出的非线性四频外差探测技术做了介绍,然后在实验上实现了非线性四频外差探测,得到了预期的结果。

## 二、非线性四频外差探测的实验原理

非线性四频外差探测是三频外差探测系统的改进。对三频外差探测系统的理论研究<sup>[1]</sup>,完全可以借鉴到四频外差探测中来。其具体方法就是在三频外差探测的基础上再增加一种本振频率以保证其连续测速功能,例如可以使用双频 CO<sub>2</sub> 激光器做光源。

非线性四频外差探测系统的原理如图 1 所示。两束光射向目标后,产生多普勒频移,返回的信号光频率  $\omega'_1, \omega'_2$  与本振光在探测器表面的叠加光场是:  $E = E_{L_1} + E_{L_2} + E_{S_1} + E_{S_2}$ ; 探测器输出的电信号是:

$$S_s = \alpha [A_{L_1} \cos \omega_{L_1} t + A_{L_2} \cos \omega_{L_2} t + A_{S_1} \cos \omega'_{S_1} t + A_{S_2} \cos \omega'_{S_2} t]^2 \quad (1)$$

考虑到  $A_{L_1} > A_{L_2} \gg A_{S_1}, A_{S_2}$ , 忽略弱信号,不考虑和频、倍频等探测器不能响应的频率,这样(1)式可表示为:

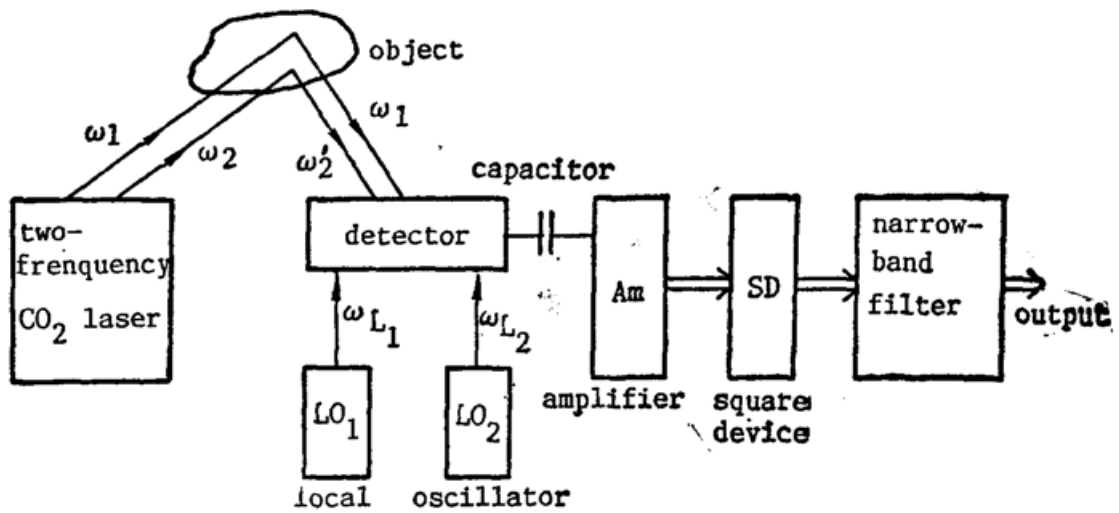


Fig. 1 The experimental principle scheme

$$S_s = \alpha [A_{L_1} A_{S_1} \cos(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t + A_{L_1} A_{S_1} \cos(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t + A_{L_1} A_{S_1} \cos(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t + A_{L_1} A_{S_1} \cos(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t + A_{L_1} A_{L_1} \cos(\omega_{L_1} - \omega_{L_1})t] \quad (2)$$

经平方律器件后,其输出的电信号为:

$$\begin{aligned} S_0 = \beta S_s^2 = \beta \alpha \left\{ \frac{A_{L_1}^2 A_{S_1}^2}{2} \cos 2(\omega'_{L_1} - \omega'_{S_1})t + \frac{A_{L_1}^2 A_{S_1}^2}{2} \cos 2(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t \right. \\ + \frac{A_{L_1}^2 A_{S_1}^2}{2} \cos 2(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t + \frac{A_{L_1}^2 A_{L_1}^2}{2} \cos 2(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t \\ + \frac{A_{L_1}^2 A_{L_1}^2}{2} \cos 2(\omega_{L_1} - \omega_{L_1})t + A_{L_1}^2 A_{S_1} A_{S_1} [\cos(2\omega_{L_1} - \omega'_{S_1} - \omega'_{S_1})t + \cos(\omega'_{S_1} - \omega'_{S_1})t] \\ + A_{L_1} A_{S_1} A_{L_1} A_{S_1} [\cos(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1} + \omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t + \cos(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1} - \omega_{L_1} + \omega'_{S_1})t] \\ + A_{L_1} A_{L_1} A_{S_1}^2 [\cos(\omega_{L_1} + \omega_{L_1} - 2\omega'_{S_1})t + \cos(\omega_{L_1} - \omega_{L_1})t] \\ + A_{L_1}^2 A_{L_1} A_{S_1} [\cos(2\omega_{L_1} - \omega'_{S_1} - \omega_{L_1})t + \cos(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t] \\ + A_{L_1} A_{L_1} A_{S_1}^2 [\cos(\omega_{L_1} + \omega_{L_1} - 2\omega'_{S_1})t + \cos(\omega_{L_1} - \omega_{L_1})t] \\ + A_{L_1} A_{L_1} A_{S_1} A_{S_1} [\cos(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1} + \omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t + \cos(\omega_{L_1} + \omega'_{S_1} - \omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t] \\ + A_{L_1}^2 A_{L_1} A_{S_1} [\cos(2\omega_{L_1} - \omega'_{S_1} - \omega_{L_1})t + \cos(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t] \\ + A_{L_1}^2 A_{S_1} A_{S_1} [\cos(2\omega_{L_1} - \omega'_{S_1} - \omega'_{S_1})t + \cos(\omega'_{S_1} - \omega'_{S_1})t] \\ + A_{L_1} A_{L_1}^2 A_{S_1} [\cos(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t + \cos(2\omega_{L_1} - \omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t] \\ + A_{L_1}^2 A_{L_1} A_{S_1} [\cos(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t + \cos(2\omega_{L_1} - \omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t] \left. \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

(3)式中的第七项

$$\begin{aligned} A_{L_1} A_{S_1} A_{L_1} A_{S_1} [\cos(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1} + \omega_{L_1} - \omega'_{S_1})t + \cos(\omega_{L_1} - \omega'_{S_1} - \omega_{L_1} + \omega'_{S_1})t] \\ = A_{L_1} A_{S_1} A_{L_1} A_{S_1} \left\{ \cos \left[ 2\omega_0 - (\omega_{S_1} + \omega_{S_1}) \frac{2V}{c} \right] t + \cos \left[ (\omega_{S_1} - \omega_{S_1}) \frac{2V}{c} \right] t \right\} \end{aligned}$$

其中:  $\omega_{L_1} = \omega_{S_1} + \omega_0$ ,  $\omega_{L_2} = \omega_{S_1} + \omega_0$ ;  $\omega'_{S_1} = \omega_S \left(1 + \frac{2V}{c}\right)$ ,  $\omega'_{S_2} = \omega_S \left(1 + \frac{2V}{c}\right)$ ;  $\omega_0$  为声光调制器的频移量。

取窄带滤波器带宽  $2(\omega_{S_1} - \omega_{S_2}) \frac{2V_{\max}}{c}$ , 中心频率  $(\omega_{S_1} - \omega_{S_2}) \frac{2V_{\max}}{c}$ , 则平方律器件输出的电信号再经过窄带滤波器后, 只允许  $A_{L_1} A_{S_1} A_{L_1} A_{S_1} \cos \left[ (\omega_{S_1} - \omega_{S_2}) \frac{2V}{c} t \right]$  项电信号的输出。

出。因此,四频外差探测系统具有连续测速的功能。

从以下实例,对四频外差探测系统与常规外差探测系统做一比较。若  $V_{\max}=300\text{ m/s}$ ,  $\omega_{s_1}-\omega_{s_2}=50\text{ MHz}$ 。则四频外差探测系统带宽(窄带滤波器):  $2(\omega_{s_1}-\omega_{s_2})\frac{2V_{\max}}{c}=200\text{ Hz}$ 。常规外差探测系统的带通滤波器带宽:  $2\omega_0\frac{2V_{\max}}{c}=10\times 10^7\text{ Hz}$ 。在此情形下,四频外差探测系统的探测灵敏度比常规的要高近 5 个数量级。

但是,由于四频外差探测系统的多普勒频移  $(\omega_{s_1}-\omega_{s_2})\frac{2V}{c}$  小于常规外差探测系统差频信号的多普勒频移  $\omega_0\frac{2V}{c}$ , 所以前者的测速精度有所下降。由以上分析可知,四频外差探测系统不仅具有三频外差探测系统的高探测灵敏度,而且还具有连续测速的功能,所以很有必要进行实验研究。

### 三、平方律放大器的研制

平方律放大器是一种特殊的变频器,主要靠非线性器件的作用来实现变频的。

通过对沟道结型场效应管的分析及实验<sup>[5]</sup>, 知道它的漏电流  $I_D$  随栅偏压  $U_{GS}$  的变化,可近似地写成:

$$I_D = I_{DSS}(1 - U_{GS}/U_P)^2 \quad (4)$$

式中  $I_{DSS}$  是栅偏压  $U_{GS}=0$  时的饱和漏电流,  $U_P$  是夹断电压。

由此可见:结型场效应管的栅偏压  $U_{GS}$  和漏电流  $I_D$  之间存在平方律的关系。

混频时,栅源之间同时有信号电压  $u_1, u_2$  因而:  $U_{GS} = u_1 + u_2 = U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos \omega_2 t$ ,

$$\begin{aligned} \text{则} \quad I_D = & (I_{DSS}/U_P^2) \left[ U_P^2 - \frac{U_1^2}{2} - \frac{U_2^2}{2} - 2U_P(U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos \omega_2 t) \right. \\ & - \frac{U_1^2}{2} \cos 2\omega_1 t - \frac{U_2^2}{2} \cos 2\omega_2 t - U_1 U_2 \cos(\omega_1 + \omega_2)t \\ & \left. - U_1 U_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t \right] \quad (5) \end{aligned}$$

所以,输出的漏电流中,除直流分量外,只包含  $\omega_1, \omega_2, (\omega_1 + \omega_2), 2\omega_1, 2\omega_2$  等分量,设计时将  $LC$  输出回路调谐到差频  $f_4 = \omega_1 - \omega_2$ , 则在回路两端就可以得到差频分量的电压信号,从而完成频率变换。

由于平方律放大器具有以上性能,将它用于四频外差探测系统,可以使探测器输出的两个差频信号再一次混频,从而获得一种我们所需要的信号,此信号的频率与本振激光器的频率无关,仅与发射信号光的频率有关,发射信号光的频率可以由双模激光器(或一束光经声光调制成两束)得到,其频率很稳,利用此信号进行外差探测可以大大提高系统的探测灵敏度,同时可以省去对本振激光器复杂的稳频过程。

### 四、CO<sub>2</sub> 激光非线性四频外差探测的实验研究

本实验所用装置系统框图如图 2 所示。

首先用 He-Ne 激光器完成本振光与信号光之间的准直。实验中多模激光器输出频差



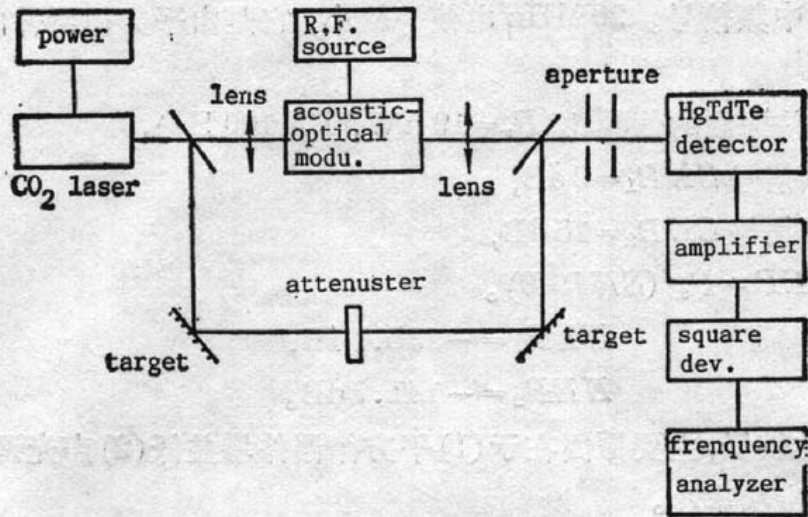


Fig. 2 Experimental setup

为 20 MHz 的双频信号, 输出总功率  $P_r = 1.18 \text{ W}$ , 激光束一路通过声光调制器, 调制频率为 40 MHz。

图 3(a)、(b) 分别是未经平方律器件后的输出, 和经平方律器件后的输出, 在频谱仪上观察到的四频外差频谱。

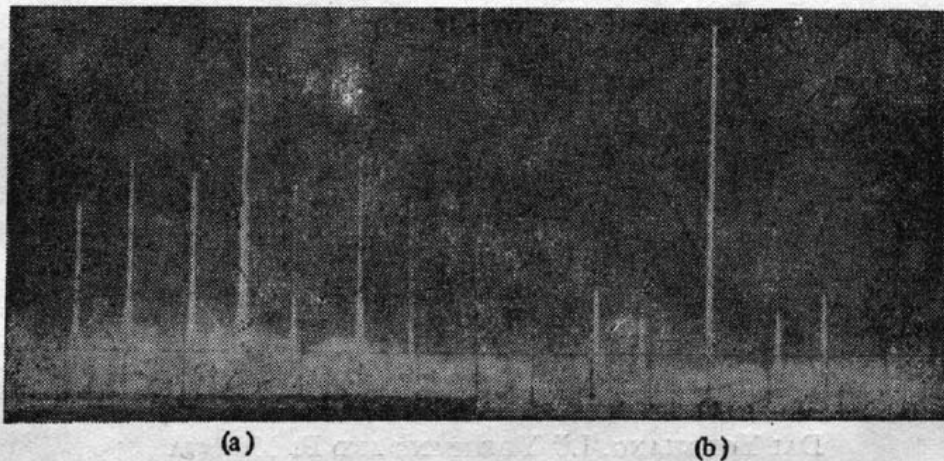


Fig. 3 The four-frequency heterodyne spectrum is observed from frequency spectrograph

(a) the output isn't passing through square amplifier,

(b) the output is passing through square amplifier

简单分析。设激光器输出双频为  $\omega_0, \omega_0 + 20 \text{ MHz}$ ; 经声光调制器后得到  $\omega_0 + 40 \text{ MHz}, \omega_0 + 60 \text{ MHz}$  的信号。将前两个作为信号光:

$$\omega_{S_1} = \omega_0 + 40, \omega_{S_2} = \omega_0 + 60; \text{ 后两个作本征光: } \omega_{L_1} = \omega_0, \omega_{L_2} = \omega_0 + 20。$$

这四成分经 HgCdTe 探测器混频, 由于探测器不能响应和频、倍频成分, 只能响应差频信号, 可以响应的只是以下频率成分的电信号:

$$\omega_{S_1} - \omega_{S_2} = 20 \text{ MHz}$$

$$\omega_{S_1} - \omega_{L_1} = 40 \text{ MHz}$$

$$\omega_{L_2} - \omega_{L_1} = 20 \text{ MHz}$$

$$\omega_{S_2} - \omega_{L_1} = 40 \text{ MHz}$$

$$\omega_{S_2} - \omega_{L_2} = 20 \text{ MHz}$$

$$\omega_{S_2} - \omega_{L_2} = 60 \text{ MHz}$$

即探测器输出频率为 20 MHz, 40 MHz, 60 MHz 的电信号, 这与照片一致。

图 3(b) 是经平方律器件后输出的频谱, 由于研制的平方律器件只能实现两种频率相减的成分, 故将 LO 振荡回路调谐到差频  $f_1 = \omega_1 - \omega_2$ , 因此平方律器件输出 40 MHz (60 - 20)

及 20 MHz(40-20)的中频信号。20 MHz 电信号较小,它是由平方律器件的附加通道引起的。

由图可见,四频外差探测的信噪比( $P_s=19\mu\text{W}$ ,  $B=100\text{Hz}$ ):

对 20 MHz 的中频信号  $SNR_1=9\text{dB}$ ,

对 40 MHz 的中频信号  $SNR_2=15\text{dB}$ ,

等效噪声功率:  $NEP=P_s/(SNR\cdot B)$ 。

$$NEP_1=-135.7\text{dB},$$

$$NEP_2=-141.7\text{dB}.$$

实验结果的信噪比较低,主要原因在于(1)平方律器件增益低(2)声光调制器前后透镜损失太大(3)激光器输出功率小。

### 参 考 文 献

- [1] R. J. 凯斯;《光探测器与红外探测器》,董培之译(科学出版社,北京,1982),310~338.
- [2] M. C. Teich and R. Y. Yen; *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**, No. 5 (May), 2480~2484.
- [3] M. C. Teich; *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **14**, No. 6 (Mar), 201~203.
- [4] R. K. Willardson and A. C. Beer; 《*Semiconductors and Semimetals*》, (Academic Press, New York, 1970), 365~407.
- [5] 清华大学;《高频电子线路》下册,(高等教育出版社,北京,1980),296~300.

## The experimental study on nonlinear four-frequency heterodyne detection of CO<sub>2</sub> laser

ZHAO XIA

(Beijing Graduate School, Mineral University of China)

DAI YONGJIANG, LÜ YUEGUANG AND PI MINGJIA

(Applied Physics Department, Harbin Institute of Technology)

(Received 25 September 1989; revised 18 April 1990)

### Abstract

CO<sub>2</sub> laser heterodyne detection is one of the promising methods for civilian and military radar. In this paper, the nonlinear four-frequency heterodyne detection have been analysed theoretically. In experiment, the nonlinear fourfrequency heterodyne detection was realized and the results obtained coincides with expected one.

Square amplifier is the key element for the processing of electric signals from heterodyne detector in four-frequency system. The main principle is described and a practical device has been made used in the experiment.

**Key words:** laser radar; heterodyne detection.