

## CO<sub>2</sub> 激光雷达实验中的 一些实际问题 (摘译)

本文对采用声光调制外差探测CO<sub>2</sub>激光雷达和多普勒(Doppler) CO<sub>2</sub>激光雷达工作中遇到的与光程和光学元件有关的一些实际光学问题进行了论述。

### 一、声光调制的 CO<sub>2</sub> 激光雷达

外差探测时,由激光器发出的激光束由分束板1分成发射光束和本机振荡光束。频率位移是由图1所示的声光调制器产生。靶的回波与本机振荡(LO)光束的混合是在分束板2上进行。CO<sub>2</sub>激光雷达频率为 $28.3 \times 10^{12}$ Hz ( $\lambda = 10.6\mu\text{m}$ ),LO光束的频率位移为40MHz。实际上这就是供探测的频差。探测到的信号在频谱分析仪上显示。当靶移动时,多普勒频移也随之产生。

实验中采用了与雷达相距90m,由圆型硬纸卡作成的漫反射靶,测量得到的信噪比为40dB。这比理论上计算的信噪比低30dB。这种偏差估计是由于实验装置中各种光学元件调正的不完善引起的。

#### 1. 红外探测器

红外探测器是由Honeywell公司制造的液氮致冷高量子效率的碲镉汞探测器。该探测器的响应度为78V/W。最佳本机振荡功率为1mW。探测器的表面积为 $0.23 \times 0.23\text{mm}$ 。用50mm焦距的氟化钡透镜将激光束聚焦在探测器上。6mm的激光束聚焦后的光斑直径为 $4f/\pi d \approx 0.1\text{mm}$ 。

#### 2. 声光(A/O)调制器

图2中声光(A/O)调制器由锗制成,型号是Isomet 1207A-6,可以提供6W功率的40MHz频率调制。经过A/O调制后的折射角度可以根据Bragg关系计算:

$$2\lambda_s \sin\theta = \lambda_L$$

这里 $\lambda_s$ 为声波波长, $\lambda_L$ 为光的波长。在锗中的声速为5500m/s,对于40MHz,频率 $\lambda_s = 137\mu\text{m}$ ,计算得到入射光束与输出光束的夹角:

$$2\theta = 77\text{mrad}$$

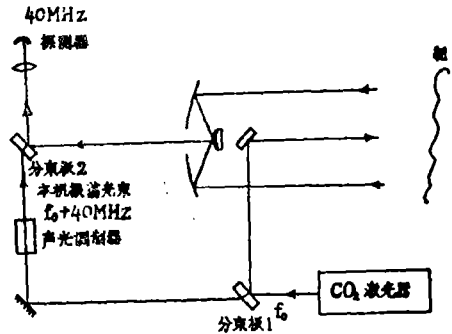


图1 声光调制的激光雷达

CO<sub>2</sub>激光束是垂直偏振的，对A/O调制器调准后，可使折射发生在同一平面内。

在A/O调制器内入射光束的功率将损失12%。透射功率的20%偏转到探测器上。当希望在探测器上得到更高的LO功率时，由于这些损耗会产生困难。为了确保非偏转光束的较强部分变弱，避免光束之间的外差效应或者烧坏探测器，调制器和探测器透镜之间的距离应在200~300mm。

我们企图消除产生于电源，并进入探测电路的40MHz强干扰，但没有成功。这种干扰是限制外差接收机对固定靶探测的灵敏度的主要原因。

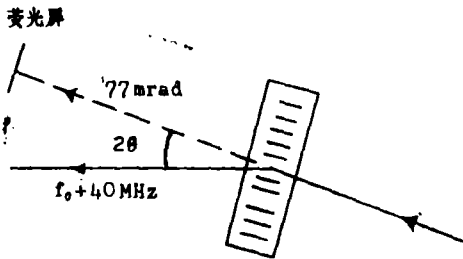


图2 声光调制器

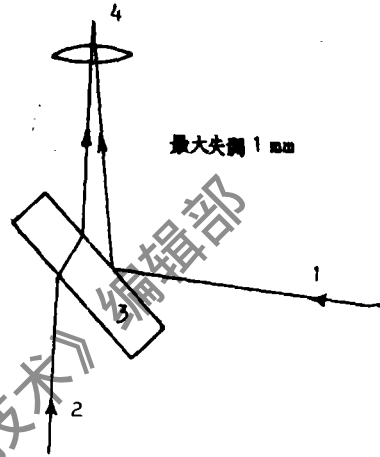


图3 分束板的失调。1.信号光束；2.本机振荡光束；3.Ge分束板；4.探测器。

### 3. 光束的调节。

必须精确的调节信号光束和LO光束同轴，以保证两者的波前在探测器接受平面上平行。如果允许的外差信号降低10%，也就是两光束失准为10mrad，在图3上分束板上失准为1mm。调节步骤如下。

- (a) 调节调制器上的LO光束，使偏转光束功率最大。
- (b) 在X, Y和Z轴上移动探测器和透镜，使得在探测器上得到最大的LO信号。
- (c) 调节发射激光束和接收机天线使两者匹配。
- (d) 对接收机光学系统进行准直和聚焦调节，使探测器输出最大信号。
- (e) 调节接受机光学系统，使其光程与LO光束光程匹配。

通常使用He-Ne激光作为初始调节，最后用斩波技术得到最佳的调整。

## 二、Doppler 激光雷达

图4为利用激光频率的Doppler漂移测量运动靶的Doppler激光雷达系统的示意图。激光束由楔形分束板分成发射光束和LO光束。接受光束与LO光束在探测器上混合，由于靶的运动产生的Doppler频率漂移，

$$\Delta f = 2v/\lambda$$

这里 $v$ 为靶的速度，如果 $v=1\text{m/s}$ ， $\Delta f=200\text{kHz}$ 。

很明显，在图4当中对采用发射机和接受机分离的两组光学系统，使它们同轴，在相同距离上会聚并与LO光束匹配，这样的调节是不容易的。

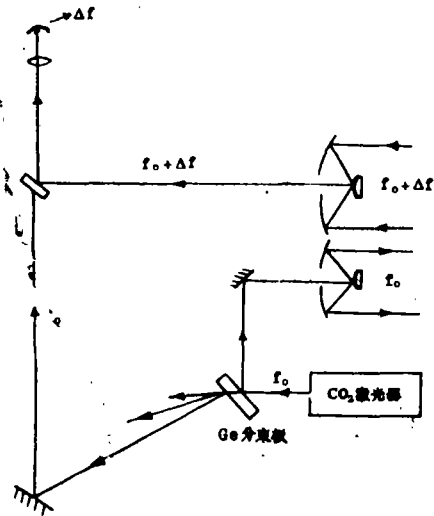


图4 Doppler激光雷达系统示意图

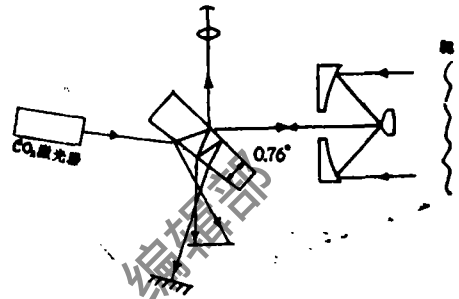


图5 Michelson干涉仪型Doppler系统分束板中光程和反射的衰减

图5为Michelson干涉仪型Doppler系统的原理示意图。该系统采用发射和接受共用的光学系统，发射和接受光束具有相同的光程，因此共同聚焦。与入射激光束成 $45^\circ$ 角的分束板将激光分束。LO光束与靶的回波信号经透镜聚焦在探测器上混合。这种系统的缺点是在探测器上不易得到最佳的LO功率。最佳的功率为 $1\text{mW}$ ，过高的功率将引起探测器的饱和。由于平行平面分束板的多次反射是很靠近的，用 $4\text{mm}$ 厚的平板分束板只能将它们隔开 $1\text{mm}$ ，因此不易将它们彼此区分开。这个问题可以用楔形分束板加以解决。

### 1. 楔形分束板

在图4和图5所表示的两种Doppler系统中，为了选择对LO适合的多次反射，采用了具有 $0.76^\circ$ 楔角的锲分束板。

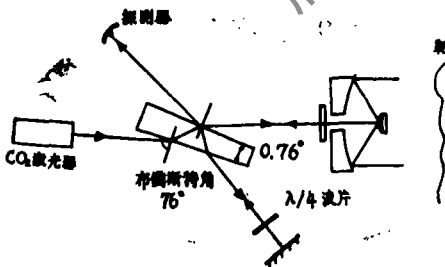


图6 锲分束板布儒斯特角放置高效的Michelson干涉仪型Doppler系统

在图5的Michelson干涉仪型Doppler系统中，为了进一步衰减光束，使用了低反射率的楔形分束板。通过楔形分束板损失了发射激光功率 $I_0$ 的 $3/4$ ，将反射到探测器上的接受信号 $I_1$ 衰减一半。在图5的楔板中，数字表示发射、接受和LO光束的强度。这种解决方法更容易控制发射和接受光学系统的准直，但还存在LO光束最佳化的问题。另一缺点是光在分束板上的损失。

在图6当中提出了更好的解决方法。在这种方案中，楔形锲分束板以布儒斯特角放置，

因此透射光束具有平行于入射平面的偏振、除了一小部分作为LO光束使用以外，其余部分将无阻碍通过分束板。为了使靶的回波信号，经过分束板后更有效的到达探测器，必须用两级 $\lambda/4$ 波片使偏振平面旋转 $90^\circ$ 。LO光束是经分束板反射回来的第一束多次反射，并反射到探测器上。为了得到与信号相同的偏振也要用 $\lambda/4$ 波片使其旋转 $45^\circ$ 。

用这种系统可将94%的激光功率发射出去，靶的回波信号的66%将到达探测器。而图6所示的系统分别为25%和48%。

### 三、望远镜的反射

图7为发射和接受共用的反射式望远镜系统示意图。发射光束的一部分由小的次镜通过主镜上的小孔反射回来，经过透镜在探测器上收集，因此产生一个额外的LO功率。但是这个反射光束并不聚焦在探测器接收面上，而聚焦在接收面后面一小段距离上。图8为具有一透镜的优良的望远镜系统。光栏在焦平面上，限制由次镜反射的立体角。然而，由于引入了一个附加的光学元件使对准变得复杂。为了减少透镜的反射，在其表面镀增透膜，凹凸透镜对于得到更大的曲率角较适宜。图9为完全无反射返回的更有效的离轴反射式望远镜系统。

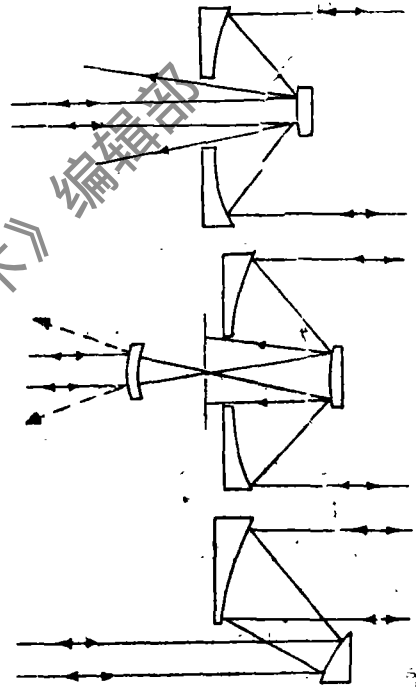


图7~9 发射和接受共用反射式望远镜系统的背向反射

### 四、平板分束板

使用平板分束板时，必须搞清楚其反射和透过特性。它与材料的折射率、入射角以及光束的偏振特性有关。反射特性是根据折射定律 $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$ 以及菲涅耳公式计算：

$$R_{\perp} = \left[ \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2 \quad (1)$$

$$R_{\parallel} = \left[ \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \right]^2 \quad (2)$$

公式(1)适用于光束的偏振方向垂直于入射平面。公式(2)适用于光束的偏振方向平行于入射平面。

假如分束板两个表面的反射率相同，透射率可以根据同样的公式计算：

$$(1 - R)^2$$

这里R或者为 $R_{\perp}$ 或者为 $R_{\parallel}$ 。

在某些情况下，必须考虑在分束板中发生的平行漂移的多次反射。虽然多次反射与主反射相比是很弱的，但有时会引起复杂的问题。但在某些情况下例如衰减光束时又可以利用它们。

对于很薄的平板分束板遮蔽多次反射比较困难。图10表示了通过平板分束板光束的光路以及计算其强度的公式。图中 $R_{\perp}$ 由菲涅耳公式(1)或(2)计算。

图11表示了平行漂移的过程以及多次反射之间距离的计算。

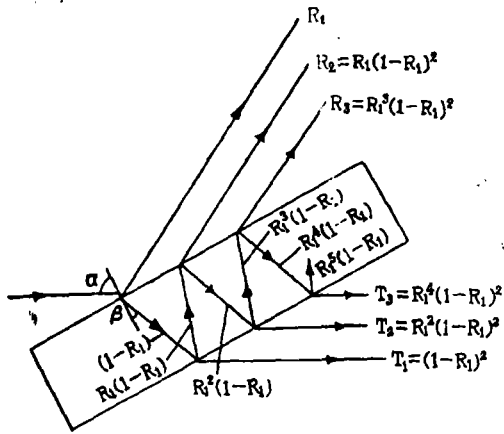


图10 在平板分束板中具有多次反射的反射率和透射率

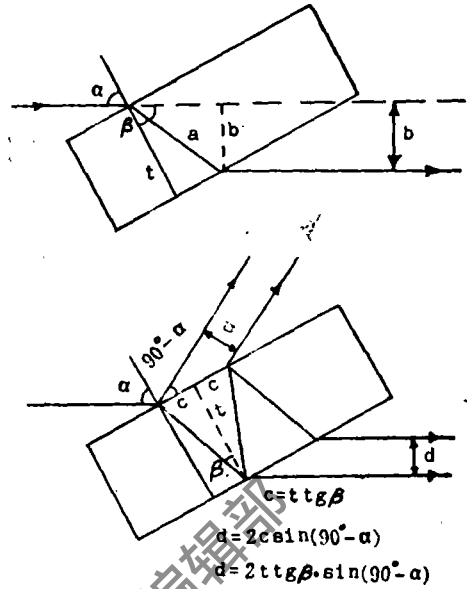


图11 平板分束板中多次反射之间的距离以及平行漂移

表1和表2给出了对于三种常用的红外材料的分束板当入射角为45°时，头三个光束的反射率和透射率的计算值。

表1 分束板的反射率和透射率（光束偏振方向垂直入射平面，入射角45°）

材 料	$n_1=10\mu\text{m}$	入射角	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$T_1$	$T_2$	$T_3$
Ge	4.0	45°	0.484	0.129	0.030	0.267	0.062	0.015
ZnSe	2.408	45°	0.281	0.145	0.011	0.517	0.041	0.003
NaCl	1.50	45°	0.0920	0.0759	0.0006	0.924	0.0070	0.00006

表2 同上（光束偏振方向平行入射平面）

材 料	$n_1=10\mu\text{m}$	入射角	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$T_1$	$T_2$	$T_3$
Ge	4.0	45°	0.234	0.137	0.0075	0.587	0.0321	0.0018
ZnSe	2.408	45°	0.0789	0.0669	0.00042	0.848	0.0053	$3 \times 10^{-5}$
NaCl	1.50	45°	0.0085	0.0083	$6 \times 10^{-7}$	0.983	$7 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-9}$

表3给出了两种不同厚度的分束板由于平行漂移过程多次反射光束之间距离的计算值。高折射率材料分束板中光束出射点的间距较大。但由于出射角的原因，光束之间的垂直距离较小。

表3 对于二种厚度的平板分束板中光束的平行漂移和多次反射的距离

材 料	入 射 角	通过光束的平行漂移		多次反射之间的距离	
		t=1mm	t=4mm	t=1mm	t=4mm
Ge	45°	0.58mm	2.32mm	0.25mm	1.02mm
ZnSe	45°	0.49mm	1.96mm	0.43mm	1.74mm
NaCl	45°	0.33mm	1.32mm	0.76mm	3.02mm

### 五、红 外 透 镜 的 焦 距

由于色散的原因，透镜的焦距在可见波段和在红外的10μm波段很明显不同。因此，用同一透镜聚焦He-Ne激光和CO<sub>2</sub>激光其焦点总不能重合。人们在选择透镜时，往往从使用的某一波长考虑。焦距可以表示为：

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (3)$$

这里n<sub>1</sub>是周围环境的折射率，n<sub>2</sub>是透镜的折射率，r<sub>1</sub>和r<sub>2</sub>为透镜的曲率半径。当波长从λ<sub>1</sub>变化到λ<sub>2</sub>，透镜的焦距按下式变化：

$$f_{\lambda_2} = f_{\lambda_1} \frac{n_{\lambda_1} - 1}{n_{\lambda_2} - 1}$$

表4给出了在可见波段和10μm波段焦距变化的实例。

表4 红外材料折射率和焦距表

材 料	波 长 (μm)	折 射 率 (n)	焦 长 (mm)
ZnSe	0.656	2.578	100
	10	2.408	112
BaF <sub>2</sub>	0.6	1.458	100
	10.34	1.396	116
CaF <sub>2</sub>	0.6	1.426	100
	9.724	1.308	138
NaCl	0.640	1.541	100
	10.02	1.495	109

摘译自N84-32804.

戴 杰 译 杨庆俊 校