

用外差探测的横向激励 大气压二氧化碳激光雷达

摘要 采用混合的 TEA CO₂ 激光发射机和外差探测接收机的实验激光测距仪已经完成了测距工作。本文介绍了这个系统,包括它的工作原理和性能特征。测距结果是具有预先测量特性的目标为5公里,自然的目标为32公里。粗略讨论了在探测和跟踪高速目标的激光雷达系统中应用 TEA CO₂ 激光发射机的可能。

绪 言

虽然报导过外差探测激光雷达曾采用不同类型的发射机,但采用混合式 TEA CO₂ 激光器作为发射机还是第一次,整个系统类似于微波脉冲雷达。为了获得高的接收机灵敏度选择了外差探测而不用直接探测。具有的信噪比足够给出95%的探测概率,外差接收机将能用来探测比同等的直接探测接收机弱 $10^2 - 10^3$ 量级的信号。高接收机灵敏度降低了激光峰值功率的要求并且打开了高重复率系统的路子。运动目标外差探测的另一个优点是可测量径向速度的多普勒频移为189千赫/米/秒。这种多普勒频移对于从固定的背景或从大气背向散射,特别在雾、雨、雪条件下区别运动目标是很重要的。

系 统 描 述

实验激光雷达系统可以分成如图一所示的基本分系统,它包括发射机振荡器、发射机频率控制器、本地振荡器、接收机、光学系统和目视瞄准系统。图二示出除了最后的马达驱动的转向镜外的光学系统,转向镜固定在实验室上面的观察圆顶里。

混合式发射机振荡器包括一个Lumonics 102 TEA CO₂ 放大部分和一个管径为2.5厘米的低压部分,一个普通的光学腔用一个曲率半径为10米的利特罗装置的反射光栅

(75对线/毫米)和一个70%反射率的平面输出窗构成。输出窗受一个10毫米的光栏限制并固定在具有12微米伸缩范围的压电转换器上。激光管里充有预先混合好的He:CO₂:N₂ (84:10:6)气体混合物,TEA放大部分的气压是一个大气压,连续低压部分为10千。具有298厘米光学腔的发射机产生单频调谐输出,连续输出功率为1瓦,脉冲峰值功率在1脉冲/秒的速率时为400千瓦。

本地振荡器为一个密封的CO₂激光器,其频率用锁定稳定器和一块具有2米曲率半径的衍射光栅稳定在10.59微米p(20)跃迁的中心。

接收机包括一个锗聚焦透镜,一个10.6微米探测器,中频放大器、包络检波器和信号显示器。透镜焦距的选择使从望远镜来的直径为1厘米的光束的聚焦所形成的爱丽斑的直径,近似于碲镉汞光伏探测器元件的尺寸。设计为低输入阻抗和供给探测器恒定偏压的前置放大器调谐到中心频率为12.5兆赫。本地振荡器功率为0.5毫瓦聚焦到探测器上,探测器产生的散粒噪音。大于探测器和前置放大器的其它噪音。线性包络检波器解调中频信号并提供距离计数器的停止脉冲。距离计数器基本上为一个14.99兆赫晶体钟驱动的闸门计数器。每一个时钟脉冲看作从发射机脉冲输出到接收的回波距离为10米的时间间隔。附加的门电路消除来自激光发射机放电的电干扰和避免来自近距离触发计数器停止阈的大气背向散射。中频或解调

性能

用此系统的测量和估计的参数，将对计算的理论测距性能和实验结果进行比较。这种比较对于改进目前的系统和预见未来系统的性能是非常有用的。

图 3 (a) 表示用光子牵引探测器记录的发射机输出脉冲的形状。此脉冲的能量用一个焦耳计测量为 380 毫焦耳。输出脉冲的频率特性是在接收机中频放大器输出端记录目标返回信号来获得。图 3 (b) 为典型的接

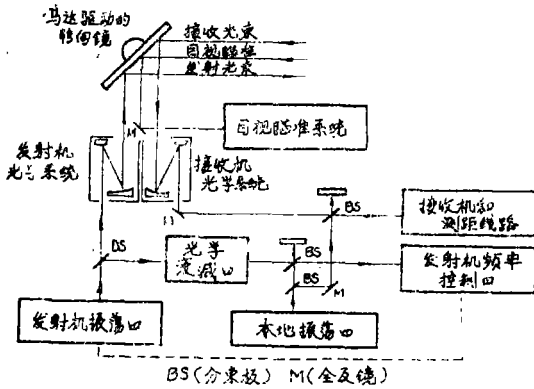


图 1 外差探测 10.6 微米激光雷达

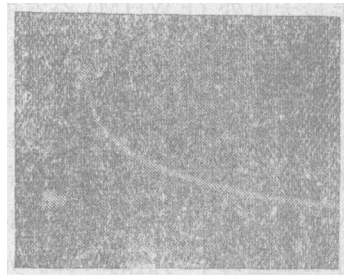
信号的特性可以在示波器上监视。

频率控制器控制发射机连续输出部分，它采用氯化钠分束板耦合。氟化钙窗提供一个附加的 60 分贝衰减，放在此光束中以避免 400 千瓦输出脉冲损坏 10.6 微米探测器。当和本地振荡器的输出混合时，到达探测器的连续波输出足够提供很好的信噪比，用来稳定频率。把连续波的拍频反馈到鉴频器并控制光学腔的长度，发射机振荡器的输出脉冲频率保持和本地振荡器的差频为 12.5 兆赫。

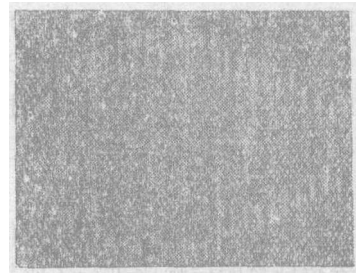
发射和接收天线为二个相同的 10 厘米直径的折叠离轴光束扩展器。激光器输出光束在发射前被扩展 10 倍。收集的回波信号光束在和本地振荡器光束重叠前，光束从直径 10 厘米减少到直径 1 厘米。接收机的整个角视场主要由输入光学系统的衍射极限来确定，约取 0.1 毫弧。

10.6 微米光学系统和目视瞄准系统用一个 40 厘米直径的马达驱动转向镜指向目标，瞄准精度小于 1 微弧。红外光束的瞄准借助于目视瞄准系统，它包括一个瞄准镜、一个用于象旋转的马达驱动的梯形棱镜和一个电视摄影机。采用这种系统，对最后转向镜的所有方位角位置，十字线和一个正象都显示在电视监视器上。

注：图 2 省略见原文



3 (a)



3 (b)

图 3：脉冲形状和频率特性：(a) 发射机输出脉冲（垂直坐标—105 千瓦/格，水平坐标—0.5 微秒/格）；(b) 中频放大器输出端接收的脉冲（水平坐标—0.2 微秒/格）。

收脉冲。脉冲前沿大约有 1 兆赫频率啁啾。在紧接着最初啁啾的微秒时间内，对于已调整的频率控制器来说，啁啾和中频信号的脉冲—脉冲频率跳动小于从照片（即小于 500 千赫）所能测量到的。典型的 1 兆赫输出脉冲的频率低于在 TEA 激光器被触发时的连续激光器的频率。比较在接收机中频的输出端脉冲包络线形状和发射机输出的脉冲形

状,指出接收机的带宽不能通过发射机脉冲的最初的尖峰信号。因此,在计算时为了决定理论的信噪比,其输出功率取测量得到的峰值的0.7。

发射机输出的发射角是用一个高质量抛物镜聚焦输出光束到加光栏限制的探测器上测量得到的。已发现约0.25的总输出能量落在接收机名义视场0.1毫弧度以内。远场光束发射角也已在距离发射机5公里处测得。由混合发射机的连续部分所产生的光束被斩光,且通过一个单一的碲镉汞光电二极管在角度内扫描,二极管位于短焦距透镜的焦点上。在半最大值处(FWHM)全宽的测量得到发射角为0.13毫弧。在低的大气扰动情况下和在最大信号的角位置时,接收信号幅度的标准偏差为平均值的0.26。在比较高的大气扰动条件下,主要由于在最后转向镜区域存在很大的温度差,当外面温度低时,接收信号的标准偏差为平均值的0.52。光束截面的功率,在中心0.1毫弧度内约为总功率的25%,因而此发射角的测量与早先用可变光栏和一长焦距反射镜的测量一致。为了计算发射机的发射角和信噪比计算中的接收机带宽特性,在0.1毫弧度发射角的范围内,发射机功率 P_T 取为70千瓦。

由已知目标用实验获得的回波信噪比与从系统参数计算的信噪比进行了比较。感兴趣的有两种:一展开型和“点”型。对每一种均计算了它们的信噪比。目标对应的角度比接收机视场大时,作为展开型的目标。激光雷达对准展开型目标时,接收到的信号功率可用下式表示:

$$PS = \frac{P_T A_r T_p}{\pi R^2 \times 10^6} \times 10^{-0.2\beta R} \quad (1)$$

式中: P_T = 在接收机视场中的辐射功率(瓦);

A_r = 接收机光学系统的面积(平方米);

T = 光学系统的透过程;

P = 目标反射率;

β = 衰减系数(分贝/公里);

R = 目标距离(公里);

外差探测时,主要的噪声源是本地振荡器功率产生的散粒噪声。功率信噪比一般由下式给出:

$$SNR = (\eta P_s) / (h\nu\Delta f), \quad (2)$$

式中: P_s = 探测器上与本地振荡器相同偏振的有用信号功率(瓦);

η = 探测器量子效率和信号与本地振荡器光束对探测器尺寸匹配所决定的有效量子效率;

h = 普朗克常数 (6.6×10^{-34} 焦耳一秒);

ν = 信号的光频率(赫芝)

Δf = 探测器和中频放大器的噪声带宽(赫芝)

将方程(1)的 P_s 代入方程(2)得到:

$$SNR = K_{s,r} (P/R^2) \times 10^{-0.2\beta R} \quad (3)$$

$$\text{其中: } K_{s,r} = \frac{\eta T P_T A_r}{h\nu\Delta f \pi \times 10^6}$$

$K_{s,r}$ 是对展开目标的系统常数,它完全由激光雷达装置的特性所决定。同样,对“点”目标的信噪比为:

$$SNR = K_p (\sigma/R^4) \times 10^{-0.2\beta R} \quad (4)$$

$$\text{其中: } K_p = \frac{\eta T P_T A_r}{h\nu\Delta f \theta_t^2 \pi^2 \times 10^{12}}$$

θ_t = 发射机的发射角(弧度),它包含着发射功率 P_T ,

σ = 雷达截面。

一个平的漫散射板反射器在垂直入射时, $\sigma = 4pA_r$, 其中 A_r 为目标的物理面积(平方米)。对于所介绍的系统以上参数为: $\eta \approx 0.2$, $\Delta f = 4.1$ 兆赫, $T \approx 0.5$, $P_T = 70$ 千瓦, $A_r = 7.9 \times 10^{-3}$ 平方米, $\theta_t = 0.1$ 毫弧度, $K_{s,r} = 2.29 \times 10^8$ 平方公里, $K_p = 7.15 \times 10^9$ 公里⁴/米²。对已知其大小和反射率的目标和光雷达站看到的自然目标研究了雷达回波。在中频放大器的输出端测量了信噪比。噪声功率是用一个校准的有效值电压

表测得, 信号功率从示波器得到。

第一个目标是一个展开的喷沙铝板固定在距离1.8公里的塔上。采用许多发射脉冲时测得的平均信噪比为 3.8×10^6 (65.8分贝), 测得的标准偏差为平均值的0.89。在测量中最大的信噪比为 11.5×10^6 (70.6分贝)。将 K_{pr} 的值, 在测量的那天大气衰减估计为1分贝/公里, 板漫反射率为0.8, 代入(3)式, 给出的信噪比为 2.47×10^7 (73.9分贝)。这是初步的测量, 因此, 计算值和测量值的信噪比的差为8.1分贝。

被测量的点目标为10厘米 \times 10厘米的喷沙铝板, 距离为4.92公里。目标板保持与光束相垂直, 用细绳挂在柱上以避免障碍物。到离地面平均高度为15米的目标的路程经过田野, 树, 路和建筑物。目标后面的物体距离相当远, 以避免目标信号回波和背景回波之间的干扰。平均信噪比为 7.7×10^3 (38.9分贝), 同时标准偏差大小相等。最大单脉冲回波得到的信噪比为 3.9×10^4 (45.9分贝)。对大气扰动, 特别是刚开始直到适应外部环境的那段范围, 整个实验室的震动对产生很大信号功率变化的贡献, 还不大清楚。用已给的 K_p , 大气衰减假设为 $\beta = 0.6$ 分贝/公里, 目标漫反射率 $P = 0.8$, 代入(4)式给出信噪比的计算值为 1.0×10^5 (50分贝)。在这种情况下, 平均的测量信噪比要比计算的信噪比低11.1分贝。根据小目标得到的结果推论指出, 在低的大气衰减条件下, 实验系统能探测雷达截面为 4×10^{-4} 平方米的目标, 距离为5公里, 平均信噪比为20分贝, 或者当大气衰减高达3分贝/公里(如在轻雾和细雨中那样), 目标的雷达截面为 4×10^{-2} 平方米, 距离为5公里, 信噪比则为15分贝。

对几个自然的和没有定标的目标也作了测距。在低的大气衰减条件下, 一个具有45厘米宽的天线塔, 距离为6.9公里, 回波平

均信噪比为40分贝。距离为9公里的屋顶, 得到的信噪比为25分贝。在低的大气衰减天气(即晴朗的天空, 气温12℃, 相对湿度为64%), 由此处得到的最大测距距离为32公里, 目标是布满了树的山。高的信噪比足够对大于70%的回波给出测距结果。在空气中一旦水的含量增加(气温19.1℃, 相对湿度为64%), 对另外一个山, 最大的测距距离减少到16公里。

结 论

用外差探测的实验型TEA CO₂激光测距仪的工作已得到证实。同时研究了发射机和接收机的特性。

从得到的测距结果证明, 它在多方面的应用中均有潜力。例如在低大气衰减条件下(≈ 0.6 分贝/公里), 实验系统能对距离为5公里, 激光雷达截面为 3.2×10^{-2} 平方厘米的目标进行测距, 信噪比为39分贝。在同样的大气条件下, 对布满树的山最大测距范围为32公里。初步测量与计算之间的差异指出, 需进一步进行研究以弄清系统的最佳化、目标的反射率以及大气特性。

外差探测的TEA CO₂激光雷达最有前途的应用之一, 是使其设计的系统能探测和跟踪高速目标如导弹和飞机。就目前的TEA CO₂激光技术水平, 发射机能在几百赫芝的重复率下工作, 峰值功率如同已报道过的实验型系统那样。有足够带宽的商品化的四象限探测器适合于接近1000米/秒的目标所产生的多普勒频移, 这就有可能发展一种灵敏的接收机使其能区别高速目标和从背景和大气背向散射引起的杂乱回波。

译自“Applied optics”

Vol. 18, No. 3 p290, 1979

(陈翔宇译 于志勤校)