

文章编号: 1001-3806(2007)05-0479-04

化学气体 CO₂ 差分吸收激光雷达告警技术的研究

童卫红^{1,2}, 江 东², 周鼎富², 杨泽后², 陈 涌², 孙 鹏², 陈云亮², 陈亦庆²

(1. 空军驻成都地区军事代表室, 成都 610041; 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了对大气中化学污染物实时检测, 采用差分吸收技术, 研制出了 CO₂ 激光差分吸收雷达原理样机, 介绍了 CO₂ 激光差分吸收雷达技术, 阐述了差分吸收雷达的基本工作原理, 并对激光雷达系统各分系统及工作流程作了描述, 对雷达系统的实物仿真及系统联调进行了模拟试验, 完成系统的多项功能的实际检测。试验结果表明, 激光器光源的光束特性(激光束输出模式及吸收峰和吸收谷支线的光束相互指向稳定性等)对雷达系统的作用距离及侦测误报率及漏报率的影响非常大。

关键词: 激光技术; 化学气体检测系统; 差分吸收; TEA CO₂ 激光器

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Study on the chemical gas detecting system by CO₂ DIAL

TONG Wei-hong^{1,2}, JIANG Dong², ZHOU Ding-fu², YANG Ze-hou², CHEN Yong²,
SUN Peng², CHEN Yun-liang², CHEN Yi-qing²

(1. The Chengdu Deputy to National Air Force, Chengdu 610041, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The technique of differential absorption lidar (DIAL) is applicable for probing chemical polluted gas. The basic principle of DIAL was introduced. The main parts of our specially designed DIAL as well as its working flows were also described. The emulation and simulation results of the lidar system were obtained. These results indicate that the performance of TEA CO₂ laser source has much influence on the capabilities of the DIAL.

Key words: laser technique; chemical gas detecting system; differential absorption; TEA CO₂ laser

引 言

在过去的几十年中,随着现代工业与科学技术的飞跃发展,环境污染问题越来越严重;此外,自二战德军在战场上使用战争毒气以来,特别是在海湾战争后,对大规模杀伤性化学武器的使用进行远距离实时侦测,以提供一定的预警时间,已越来越引起军方的普遍重视。因此,对大气中化学污染物质的实时检测,在军民两方面都有十分重要的应用背景,得到了世界各国的普遍重视^[1,2]。

对化学气体的检测,其中一个非常有效的方法是通过长程差分吸收原理,利用现代激光雷达技术来实现远距离实时遥测告警。由于绝大多数的化学气体在 8 μm ~14 μm 的红外波段都具有非常典型的吸收谱带,因此可以利用化学气体物质的这种吸收特性,采用在

波段上具有丰富谱线资源的可调谐 TEA CO₂ 激光器,来实现对化学气体的种类、浓度、分布等特征进行侦测^[3~6]。此项技术在出现以后即得到迅猛的发展,目前已成为 CO₂ 激光器的一个非常典型的应用之一^[7]。国外从上世纪 70 年代起,就先后投入巨资对 CO₂ 激光差分雷达系统进行了系统研究,开发出了如美国的 AFRL/VSBC 系统、俄罗斯的 KDKhR-1N 激光毒气报警系统、德国的 VTB-1 遥测化学战剂传感器、法国的 DETADIS 系统等,装载于包括车辆、装甲及机载等机动平台上,可以完成数公里到数十公里范围的实时监测任务,其中部分产品已经列装。我国对远距离激光差分雷达系统从 20 世纪 80 年代起就开始了研究,如安徽光机所研制的用于大气环境监测的紫外激光雷达车载系统,可用于环境部门对大气进行实时检测。但对于 CO₂ 激光差分雷达系统(differential absorption lidar, DIAL)的研制,还未见相关报道。

该项技术充分利用及发挥了激光的单色性、高亮性及高指向性等特点,并利用了化学气体分子对激光的吸收、散射等特性来实现对化学污染物气体云团的远距离监测。作为一种主动侦测手段,其探测距离

作者简介:童卫红(1969-),男,博士,现主要从事激光雷达系统的研究。

E-mail: cdtwh@163.com

收稿日期:2006-08-28;收到修改稿日期:2006-12-04

可以达到数公里甚至数十公里,可以全方位、实时地对战场上的大气环境进行监测,同时具有搜索、探测、识别、量化、定位等功能,能根据需要把监测区域内的多种化学气体分布信息及时传输到指挥中心,为上级部门的决策提供必要的依据。将该系统在军事上进行应用,可大大提高我军防化系统技术含量,建立一个远距离、快捷、准确的防化预警体系,对于在未来的局部战争及周边战争中有效降低敌方生化武器的破坏及杀伤力,保存我军的有生力量,抗御敌方生化武器的威慑等都有重要的现实意义。

1 地物反射式差分雷达的原理

差分雷达系统是利用化学物质的特征吸收谱来对化学物质种类及浓度等特性进行识别的。由于每种化学污染物都有其固定的特征吸收谱,由一台或多台可调谐激光器在一定时间间隔(大气“冻结”时间之内)内沿同一传输路径发出至少两种特定波长的激光束,其中一种波长位于待测化学物质的特征吸收峰位置 λ_{on} ,另一波长位于吸收谷位置 λ_{off} 。两束激光先后经过待测化学物质区域,并在遇到前方地物目标反射后再次经过该区域。由于化学物质对这两种激光谱线的吸收系数不同,因此激光雷达所接收到的地物后向散射激光的归一化能量将产生一定差异,通过测量后向散射光中两种波长激光的相对强度值,就可以确定激光束经过路径上是否存在该种化学物质,以及其浓度(或浓度厚度积值)、方位等特征信息,并根据情况发出报警信号。该方法在理论上可消除大气中其它气体分子和气溶胶的衰减、大气仪器参数以及大气条件局部变化而引起的背景干扰及激光雷达系统的系统误差对探测精度的影响^[8]。图1是其工作原理示意图。

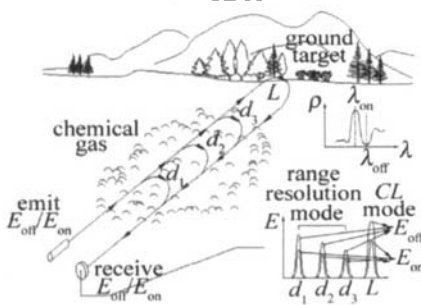


Fig 1 Theory schematic of DIAL

根据差分吸收激光雷达方程,可以推导出采用DIAL所探测目标气体的浓度为^[9]:

$$C = \frac{1}{2L(\alpha_{on} - \alpha_{off})} \cdot [\ln(E_{off}/E_{on}) + \ln(\rho_{on}/\rho_{off}) + \ln(\eta_{on}/\eta_{off}) - 2L(\beta_{on}/\beta_{off})] \quad (1)$$

式中, E 是两种波长激光回波的归一化接收能量值, ρ 是目标反射率, η 是系统光学效率, α 是目标气体的吸

收系数(与气压、温度等大气环境因素相关), β 是其它大气因素因散射和吸收造成的衰减因子, L 是目标云团的厚度。从上式可以看出,被探测气体的浓度距离积值 CL ,除了与归一化接收谷能量 E_{off} 和接收峰能量 E_{on} 之比有关外,还与待测气体的特征吸收系数 α 有关。此外,目标反射率、系统光学效率和大气衰减因子对两束不同波长激光的差异,也将影响到被测气体的浓度测量,而这类影响在实际工作中由于涉及到大气及各种地物目标对不同谱线的很多测量及定量等复杂问题,因此,在实际工作中,往往采用相邻较近的激光谱线来进行化学物质测量。这样,由于波长不同所造成的目标反射率、系统光学效率及大气衰减等因素就可以基本忽略不计。此时,(1)式变为:

$$CL = \frac{1}{2(\alpha_{on} - \alpha_{off})} \cdot \ln(E_{off}/E_{on}) = \frac{1}{2(\alpha_{on} - \alpha_{off})} \times [\ln(E_{off,in}/E_{off,out}) - \ln(E_{on,in}/E_{on,out})] \quad (2)$$

式中, CL 为浓度距离积值, E_{in} 表示接收到的激光回波能量, E_{on} 表示激光发射能量。因此,通过调谐激光器发射出与化学物质特征数据库待测物质的吸收峰及吸收谷相对应的激光谱线,并对激光回波的归一化能量进行测量,结合特征数据库中该化学物质对当前大气环境条件相匹配的吸收系数,就可以计算出所测量路径上该种化学物质的浓度距离积值。

2 差分吸收雷达系统简介

DIAL雷达系统主要由可调谐高重频脉冲TEA CO₂激光器、发射及接收天线、收发同步定位扫描、激光回波信号的差分吸收信息处理、显示与告警通讯以及中央控制处理等分系统组成,系统功能模块原理框图如图2所示,所研制的CO₂激光差分雷达系统实物如图3所示。

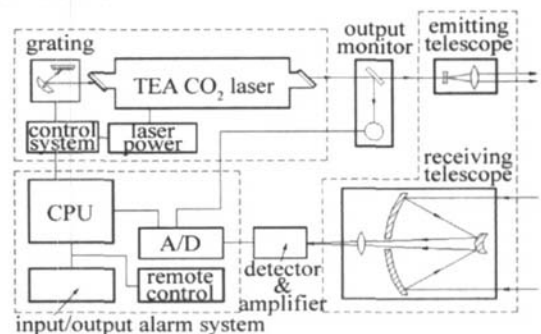


Fig 2 Schematic diagram of DIAL system

系统采用一台捷变频可调谐高重频TEA CO₂激光器作为照射光源,安装于雷达系统的底部及右侧部(高压电源)。该激光器采用快速振镜来实现谱线的快速调谐,可输出约50条激光谱线,覆盖9.4 μ m~11 μ m范围,其工作谱线单脉冲能量设计大于100mJ(TEM₀₀),

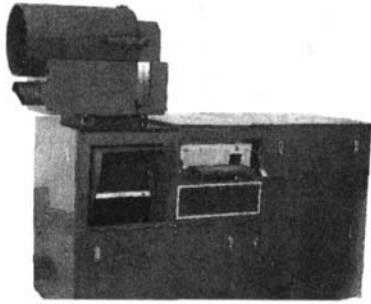


Fig 3 Picture of the DIAL system

最高重频 100Hz,可满足系统近 10km 的探测距离及大气冻结时间内两支特征谱线快速切换的发射要求。该激光器由一台工控机控制,与总控机通过通讯口及触发控制和时序同步控制连接,可实现与总控机的数据通讯及同步。

系统工作时,由操作手在总控机操作界面上选出待测化学物质,系统自动从特征数据库中选出与待测化学物质的特征吸收 (λ_{on} , λ_{off}) 相对应的 TEA CO₂ 激光谱线对数据,并传送到激光器计算机中。总控计算机发出时序同步控制信号,激光器将按照设定的谱线顺序先后调谐发射出所要求的激光脉冲对。输出激光脉冲经两片反射镜后被引导到 10 倍的反射式发射天线后发射向目标区域。在该过程中,一能量监测组件 (含透过率 99% 的 ZnSe 分光镜、快速热释电探头、放大器、高速数字采集卡,以及相关控制软件) 被用于完成对发射激光脉冲的能量监测。需要注意的是,由于 ZnSe 分光镜对不同波长激光谱线的透过率并不完全一致,因此,系统需要预先对各种波长的谱线能量进行标定。

激光散射回波由一 $\varnothing 350\text{mm}$ 的大口径 RC 卡氏接收天线收集,由液氮制冷的 HgCdTe 探测器探测,并经约 70dB 的宽带放大器放大后,模拟电信号送入总控机中的一块 Gage CS14200 高速采样板中进行 200MHz (14bit) 的数字采集。该采集卡工作在多记录模式,在完成一串激光脉冲对的多个回波采集后,系统一次性从采集卡内存中读出采集原始数据并进行后期运算处理,并分别计算出各个激光脉冲对应的回波幅度值。由于激光脉冲的宽度一定,因此,激光回波的幅度值代表了回波的能量大小。通过对激光回波的原始信号进行实时滤波算法处理,可以大大提高系统探测信噪比,从而实现远距离激光回波脉冲信号的有效识别^[10]。

在每串激光脉冲对发射完毕后,总控计算机通过通讯口从激光器控制计算机中读取每个激光脉冲的能量检测值,与总控机对激光脉冲的回波检测值进行一对一的归一化综合计算及平均处理,分别得出各组 λ_{on} 与 λ_{off} 的归一化能量平均值,并带入 (2) 式中,计算

出该次探测中相应物质的 CL 值及地物目标距离等数据,然后在控制程序显示界面上,按照对雷达扫描侦测及 CL 值的侦测情况进行显示。如果所侦测的浓度超过设定的告警阈值,系统立刻进行声光报警。

发射及接收天线等部件装载于一维转动平台上,可实现雷达系统对水平 120° 范围的自动扫描及 $-15^\circ \sim +30^\circ$ 的人工垂直调节监测。在完成单点测试分析后,雷达系统可以控制转动平台扫描转动到下一探测方位,并重复进行上述操作。水平扫描步进量可根据具体情况变化,以实现系统的粗扫和精扫目的。系统水平 120° 全场扫描报警时间小于 2min。

3 实验结果

目前已完成了对雷达系统的系统实物仿真及系统联调试验。其中实物仿真试验采用程序设定在系统发射虚拟激光脉冲时,模拟雷达系统侦测到脉冲对的归一化回波幅度在某一扫描角度范围内出现了较大变化,且该变化量随化学物质浓度及大气变化而出现一定起伏。通过系统的实物仿真试验,可以完成系统的多项功能 (包括扫描、控制、通讯、DIAL 算法、系统软件及告警等) 的实际检测,并确定雷达系统的正常综合运行工作情况。系统实物仿真试验结果如图 4 所示,

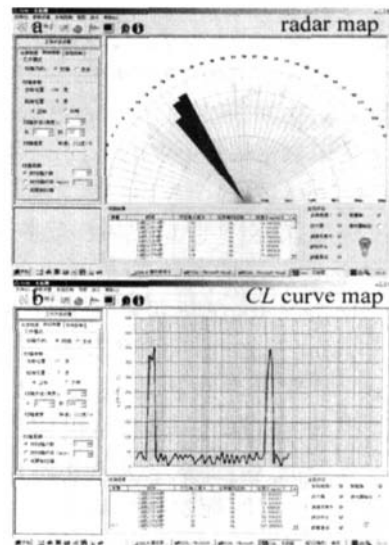


Fig 4 Emulating results of DIAL system

其中图 4a 为仿真侦测结果的雷达图,图 4b 为 CL 曲线图。从图中可以看出,雷达系统进行了 $0^\circ \sim 120^\circ$ 范围的水平扫描,每步进量为 4° 。在 $25^\circ \sim 35^\circ$ 范围侦测计算出磷酸三磷酯的 CL 出现异常超标 (超过设定的阈值 $300\text{mg}/\text{m}^2$),系统在雷达图中自动以深色标示出该区域,并立刻进行声光报警;而在 CL 值较低的其它区域为安全区域,雷达图中以浅色进行标示。

实际联调时,系统控制激光器发出所需要的激光

脉冲对,对远距离地物目标进行侦测。由于调试环境所限,在联调试验时只作定点侦测。另外,由于系统到地物目标之间无法布设待测的化学物质,因此,采用了降低激光器工作频率,通过按比例遮挡接收天线的方法,来模拟吸收峰谱线 λ_{on} 的吸收情况,从而计算出在各种遮挡比下,系统侦测到的 CL 值变化情况。图 5 为激光以 1Hz 工作时,激光器在两种性能状态下所测量到的 CL 值曲线分布情况。从试验结果来看,激光

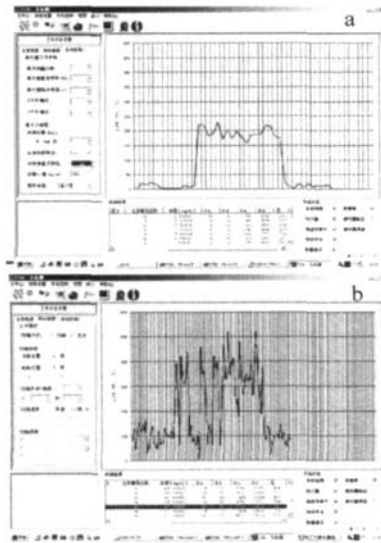


Fig 5 Test results of DIAL

a— CL map getting at 3.5 km (TEM_{00} mode for laser shots @ 1Hz) b— CL map getting at 2.1 km ($TEM_{(>5)0}$ modes laser shots @ 1Hz)

器的性能参数对雷达系统测量结果的影响非常大:在采用一台处于基模、脉冲对光束的指向一致且稳定性好(跳动小于 0.1mrad)的 TEA CO_2 激光器情况下, CL 值测量结果较稳定,能对实际情况做出反映,探测作用距离主要受限于激光器的输出能量及大气扰动的影响。系统在 1Hz 情况下,在晴朗天气下得到的最大有效距离大约 3.5km (见图 5a),当作用距离更大时,因大气抖动导致 CL 测量曲线出现较大幅度的起伏变化。此时通过提高激光器的重频,可以使得测量结果的起伏变化大大降低, CL 曲线变化平坦。而在激光器模式较差(高阶模)时,所测量到的结果很差,如图 5b 所示,此时 CL 值起伏较大,系统信噪比低,出现误报及漏报现象,作用距离也大大受到限制。造成该现象的主要原因在于激光器所采用的调谐转镜在对于不同支线进行快速来回捷变时,因各种原因出现输出激光脉冲对的模式抖动,以及 λ_{on} 与 λ_{off} 光束指向性不稳。

这使得激光束对于固定目标的照射均匀性及方向性出现较大抖动,从而使得激光回波的探测幅度出现较大的不确定性,最终导致雷达系统出现较大的测量误差。此时需要对激光器作进一步的改造工作。

对雷达系统的完整评价需要进行系统的外场试验。目前由于各种因素影响,该评价试验还在准备中,相关的试验结果将在后续的文章中进行报道。

4 结论

化学物质差分吸收激光雷达系统是集光、机、电、计算机、算法和控制技术于一身的一个复杂综合性系统,在军民上有及其重要的应用前景,其发展与激光器技术、探测接收技术及微弱信号的处理技术等的发展是密切相关的。从目前国内在相关技术领域内的进展情况来看,仍然应该注重各单项技术的不断研发,在此基础上不断完善自己的环境遥测激光雷达监控系统,以尽快达到实用化水平。

参考文献

- [1] PRASAD C R, KABRO P, MATHUR S Tunable R differential absorption lidar for remote sensing of Chemicals [J]. Proc SPIE, 1999, 3757: 87~95.
- [2] TORUMIR, TAIH, TAKEUCHI N. Estimation of various atmospheric constituent measurements by using solid state tunable lasers [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1993 (4): 2150~2151.
- [3] YAN J X, GONG S S, LIU Zh Sh Environment detecting lidar [M]. Beijing: Science Press, 2001. 135~194 (in Chinese).
- [4] SI F Q, LIU J G Determination of size distribution of atmospheric aerosol by DOAS [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55 (6): 3165~3169 (in Chinese).
- [5] CHAN N M L, HAUCHECORNE A. Lidar study of the structure and dynamics of the middle atmosphere-re [J]. Indian Journal of Radio and Space Physics, 1991, 20 (1): 1~11.
- [6] YANG L J, ZHANG Y Ch, LIU X Q *et al* Optical properties of aerosol detected by mobile lidar system [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21 (1): 88~91 (in Chinese).
- [7] DAI Y J. The principle of lidar [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 232~281 (in Chinese).
- [8] EDNER H, FREDRIKSSON K, SUNESSON A *et al* Mobile remote sensing system for atmospheric monitoring [J]. Appl Opt, 1987, 26 (19): 4330~4338.
- [9] ZHAO B L, ZHANG A S. The principle of atmosphere detecting [M]. Beijing: Weather Press, 1987. 1~10 (in Chinese).
- [10] CHEN Y, WANG Y L, ZHOU D F. Faint signal processing of lidar based on wavelet multi-resolution analysis method [J]. Laser Technology, 2005, 29 (3): 278~280 (in Chinese).