

生化战剂激光侦检技术的发展概述

吴慧云 孙振海* 黄志松 生 甦 王 华 徐卸古

(军事医学科学院科技部, 北京 100071)

摘要 生化战剂在恐怖主义活动和非军事领域的非法使用对社会公共安全造成了严重的威胁。分析了基于米氏散射、瑞利散射、拉曼散射、吸收光谱和诱导荧光光谱信号的生化战剂激光侦察报警和快速检测技术的基本原理, 说明了生化战剂激光侦检系统的关键技术, 回顾了美、俄、德、法等围生化战剂激光侦检技术的发展情况。

关键词 遥感; 生物战剂; 化学战剂; 激光侦检技术

中图分类号 O433.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.020001

Development of Laser Warning and Detection Technology for Chemical/Biological Agents

Wu Huiyun Sun Zhenhai Huang Zhisong Sheng Shen Wang Hua Xu Xiegu

(Department of Science and Technology, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100071, China)

Abstract Application of chemical/biological agents in terrorism and unmilitary fields induce serious impact to the public safety. Principles of laser warning and detection technology for chemical/biological agents based on Mie scattering signals, Rayleigh scattering signals, Raman scattering signals, absorption signals and laser induced fluorescence signals are described. The key technologies in the laser warning and detection system are analyzed, the laser warning and detection technology development profiles in the United States, Russia, German and France are introduced.

Key words remote sensing; biological agents; chemical agents; laser warning and detection technology

OCIS codes 280.1415; 290.1090; 000.1430; 290.1350

1 引言

生化战剂是指生物战剂和化学战剂的总称^[1~4], 生物战剂包括多种病毒、细菌、立克次体、衣原体、真菌和毒素等^[2,3], 化学战剂包括神经性毒剂、糜烂性毒剂、全身中毒性毒剂、失能性毒剂、窒息性毒剂、刺激性毒剂和植物杀伤剂等^[3,4]。生化战剂具有生产制造简单、部署方便、杀伤力强和成本相对低廉的特点, 早在1925年, 国际社会就在日内瓦签订了《禁止在战争中使用窒息性、毒性或其他气体和细菌作战方法的议定书》, 禁止利用具有大规模杀伤性的化学/生物战剂进行化学战^[4,5]。然而近年来, 生化战剂在世界范围内的大规模突发事件、恐怖活动和非军事领域中的非法使用已对公共安全造成了巨大危害: 1995年日本奥姆真理教在东京地铁释放沙林(GB)毒气, 造成12人死亡, 约5500人中毒, 1036人住院治疗^[4,5]; 2001年美国发生多次污染炭疽芽孢的邮件, 并出现了数例炭疽患者^[5,6]; 2003年8月, 齐齐哈尔市某工地挖出的5个装有日军遗弃芥子气毒剂的金属桶不慎泄漏, 造成1人死亡, 43人受伤^[7]。面对这些现实的威胁, 许多国家正在积极研发生化战剂的侦察报警和快速检测技术与装备^[7~10]。

传统的生化战剂侦检方法主要依靠防化人员的检毒装备现场检测或将采集到的样品送至毒剂分析实验室进行检测, 侦检过程时间长、速度慢, 且接触式检测对防化人员自身的安全具有严重威胁^[10]。伴随着激光器技术、光电器件制造技术和光谱检测技术的发展, 激光检测已经发展成为生化战剂远程侦检的主要技术手

收稿日期: 2012-09-26; 收到修改稿日期: 2012-10-22; 网络出版日期: 2012-11-12

作者简介: 吴慧云(1984—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事激光生物检测技术方面的研究。

E-mail: kkwkkw012821@163.com

* 通信联系人。E-mail: sunzhenh@tom.com

段。与传统侦检方法相比,激光侦检技术具有非接触式、远距离、反应迅速、预警时间长和三维实时监控等优点。本文分析了生化战剂激光侦检技术的基本原理,并概述了美、俄、德、法等国生化战剂激光侦检技术和相关装备的发展情况。

2 激光侦检技术的基本原理

激光侦检系统的结构组成如图 1 所示,主要由光源与发射模块、信号接收模块和信号检测与自动报警模块 3 大部分组成。光源与发射模块通常由激光器、光束准直器和光束发射装置组成;信号接收模块主要由接收装置、窄带滤波器和光电检测器件组成;信号检测与自动报警模块主要由放大器、显示器、信号取样平均器、微机、自动报警装置和通信设备组成^[11~14]。激光侦检系统工作时,光源产生激光束,激光束经准直后由发射装置发射至目标处,光束与战剂目标相互作用后的出射信号由接收装置接收,接收信号经窄带滤波后进行光电转换和信号分析,完成对战剂目标的检测。根据检测信号类型的不同,激光侦检系统可分为米氏散射系统、瑞利散射系统、拉曼散射系统、吸收光谱系统和激光诱导荧光系统 5 大类^[15~17]。

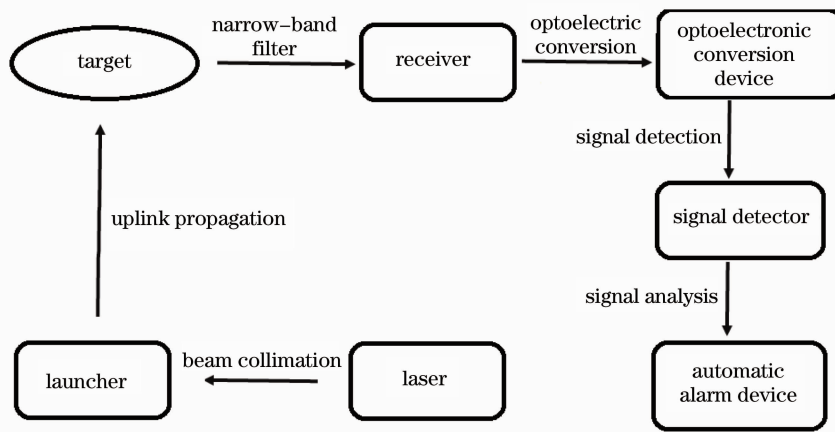


图 1 激光侦检系统的结构组成

Fig. 1 Schematic of a laser warning and detection system

米氏散射系统是以大气气溶胶粒子对激光束的米氏散射信号作为检测信号的激光侦检系统^[12,15]。当激光照射在尺度显著大于波长的粒子上时,将发生米氏散射现象。米氏散射过程中,气溶胶粒子可等效为一个多极子阵,多极子阵受到入射光子的激发向外辐射次生的电磁波,它们在远场区叠加就构成了散射波。与其他散射机制相比,米氏散射过程的散射截面较大,且大气气溶胶粒子大多处在较低高度大气范围内。米氏散射系统通常用于 30 km 以下低空大气的尘埃、云雾等气溶胶粒子的检测^[12,15]。

瑞利散射系统是以大气分子对激光束的瑞利散射信号作为检测信号的激光侦检系统。当激光照射在尺度显著小于波长的大气分子上,将发生瑞利散射现象。瑞利散射是指大气分子受到入射激光电场的作用,在分子内产生感生电偶极矩,随着电场的振动,极化会以相同频率改变并辐射同样频率的信号。由振动电偶极子的总辐射能推导出瑞利散射的辐射能为

$$I = \frac{16\pi^4 c}{3\lambda^4} \alpha^2 E_0^2, \quad (1)$$

式中 c 为光速, α 为极化张量, λ 为激光波长, E_0 为光振幅。瑞利散射系统通常用于中层大气密度轮廓、温度轮廓和重力波的检测^[15,16]。

拉曼散射系统是以大气分子对激光束的拉曼散射信号作为检测信号的激光侦检系统。拉曼散射是一种非弹性散射,在散射过程中大气分子与激光光子交换能量,使散射波长发生改变,且散射过程中大气分子和激光光子交换能量的多少严格由各种分子内部的固有能级特性决定,拉曼散射信号携带着大气分子结构信息。由于拉曼散射的散射截面太小,拉曼散射系统通常用于高浓度或者近距离目标的检测^[15,16]。

吸收光谱系统是以被检测大气物质对激光束能量的吸收信号作为检测信号的激光侦检系统^[15,16]。为了提高系统检测灵敏度,吸收光谱系统通常采用差分吸收方式,即采用两束波长稍有差别的激光束,其中一

束激光波长选择在被检测物的吸收峰中心,另一束激光的波长选择在吸收峰之外,通过差分检测两束激光的回波信号可有效排除被测物以外消光因素的影响。由于差分吸收光谱系统的灵敏度高,通常用于大气微量组分的检测^[15,16]。

激光诱导荧光系统是以激光诱导被检测大气物质荧光信号作为检测信号的激光侦检系统^[15,17]。激光诱导荧光的基本原理是被检测物质吸收激光光子,使得相当数量的分子提升到激发态,进而通过自发辐射返回基态并出射光子。根据能级结构的不同,荧光可分为共振荧光、斯托克斯荧光、反斯托克斯荧光和碰撞辅助双共振荧光。激光诱导荧光检测技术灵敏度高、检测效果好,广泛应用于物质结构检测等领域^[15,17]。

3 生化战剂激光侦检系统的关键技术

生化战剂激光侦检系统总体可分为硬件设备和技术软件两部分。硬件包括完成各项技术性能所建立的功能组件和激光探测系统,如激光发射、信号接收、自动扫描、样本分析、数据处理、控制系统和报警装置等;技术软件包括利用激光技术对生化战剂的侦察、报警、采样、检测、信息处理、评价测试的技术方法和分析控制软件。

3.1 激光器技术

激光侦检系统要求激光器波长可调谐,并且希望可调谐范围尽量宽,以便探测尽量多的生化战剂种类。全固体光参量振荡器(OPO)具有波长连续调谐能力,而且体积小、重量轻,近年来已成为生化战剂和大气污染遥感探测方面热点研究领域。大量生化战剂的特征光谱处于 8~12 μm 波段范围内,目前,OPO 已实现 1.064 μm 激光向该波段的转换,但由于存在复杂的量子转换过程,能量转换效率低,还未有成熟的 OPO 器件可供工程应用。

3.2 信号自动识别技术

激光侦检系统利用差分吸收、差分散射、弹性后向散射、感应荧光测量等原理,对战剂样本进行采集、提取、检验、分析和信息处理,获取战剂的有关参数。不同物质分子与激光相互作用时会产生特定的吸收或荧光光谱,利用技术软件对信号光谱进行分析,自动识别特征信号并对目标类别进行判定是激光侦检系统的关键和难点技术之一。尤其是被检测目标由多种成分组成时,战剂信号的自动识别难度会大幅度提高。

3.3 一体化集成技术

生化战剂激光侦检系统工作时,由激光源发射光束扫描目标区域,分析、提取回波信号,对战剂样本信号进行检验,获取各种目标参数,实现对目标的遥测、搜索、定位、识别和监视,而后通过无线或有线通道向控制系统发出报警信号。系统将目标侦察、目标跟踪、信号检测和自动报警技术综合一体化。

生化战剂激光侦检系统的检测要素众多,主要包括目标的类别、距离、范围、厚度、浓度、离地高度、中心角坐标等。其中目标类别通过回波特征信号对比分析得到,目标距离由激光测距技术得到,目标的方位角和俯仰角可通过发射望远镜基座方位和俯仰轴上的轴角编码器分别测得,在此基础上结合目标距离可分别确定战剂气溶胶云分布的方位、范围、离地高度、中心角坐标等参数。

4 生化战剂激光侦检技术的发展情况

为了适应未来军事和公共安全的实际需要,美、俄、德、法等国都在致力于研究和建造能在野战条件下使用的、高灵敏度、快速响应的生化战剂激光侦检装备,并取得了很大进展,先后研制出多种类型的生化战剂激光侦检装置^[18,19]。

4.1 美国

美国对生化战剂激光侦检技术的研究开展最早、投资力度最大、水平最高,先后实施了多个技术发展规划,研制了多种类型的生化战剂激光侦检系统^[18,19]。1958年,美国陆军就宣告研制成功第一台主动式毒剂遥测仪(LOPAIR)。LOPAIR是一种基于含磷毒剂对 9.8 μm 波长红外线差分吸收原理的光雷达,系统总重 54 lb(1 lb=0.4536 kg),检测距离 400 m,对 0.01 $\mu\text{g/L}$ 浓度的神经毒剂有响应^[19,20]。20世纪70年代,美国陆军探索性地研制了同位素 CO_2 激光雷达,检测距离为 1 km,可检测神经毒剂和模拟剂,灵敏度为

500 mg/m²[19,20]。与此同时,美国陆军与布鲁克工程公司合作,研制了一套拉曼散射激光雷达,系统使用一台“宇宙线 2-J”红宝石激光器,全套设备装在一辆拖车上,可在野外不同气候条件下进行污染剂遥感测量,检测距离 400 m,距离分辨率 10 m,对 SO₂ 的灵敏度 3×10^{-4} m^[19,20]。该系统经改进后能用于测量 G 类和 V 类神经毒剂,且作用距离增加到 2 km^[19,20]。美国空军在 20 世纪 80 年代研制成功一套差分吸收激光雷达 (DIAL),其系统结构如图 2 所示。DIAL 系统光源为频率可调的 CO₂ 激光器,能发出波长位于 9~10 μm 波段的 60 条谱线,以供选择用于照射毒剂。DIAL 系统的作用距离 2 km,对神经毒剂的灵敏度为 0.01 mg/m³,对芥子气的灵敏度为 0.1 mg/m³[20,21]。

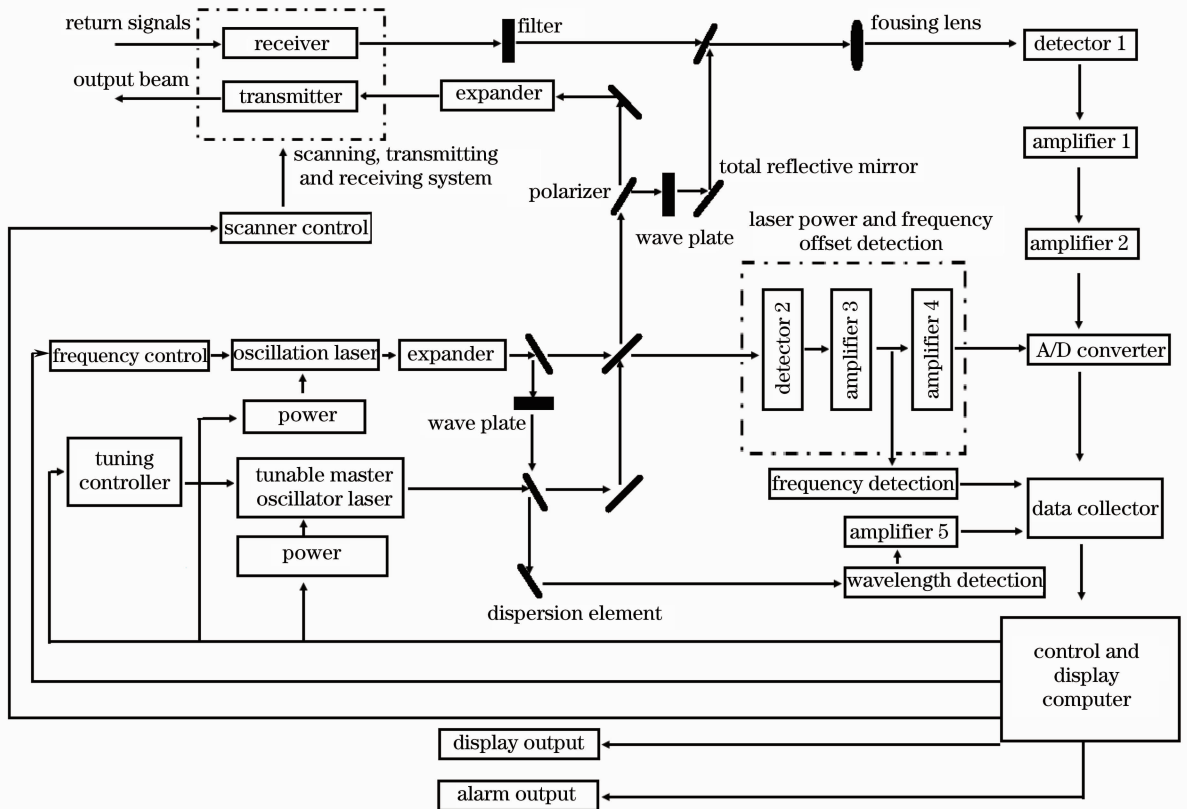


图 2 差分吸收激光雷达结构组成

Fig. 2 Structure of the DIAL system

按照设计,每个空军基地机场塔台下的工事中安装 2 台 DIAL 就足以对整个机场实施毒剂监测。1986 年,改进后的 DIAL 系统体积和重量都有所减小,检测距离也增加到 7 km,更有利于野外使用[22]。

美国海军在 20 世纪 80 年代部署了 AN/KAS-1 化学战定向检测装置,其组成包括前视红外检测器和阶跃式滤光片,侦检距离达 5 km,可识别蒸气云中的神经战剂,系统实物图如图 3 所示[23,24]。20 世纪 90 年代,美国陆军研发并投入生产了 M21 型化学战剂报警系统(M21RSCAAL),实物图如图 4 所示[25,26]。该系统基于 8~12 μm 光谱仪和麦克耳孙干涉仪及图形识别技术,可侦检 5 km 以外的神经性和糜烂性战剂。此后,埃奇伍德研究工程和发展中心在 M21RSCAAL 的基础上研制了轻型防区外化学战剂检测器(M22ACADA),实物图如图 5 所示。M22ACADA 降低了误报率,提高了灵敏度,具备了运动中的侦检能力,1994 年制造并演示了 300 s⁻¹ 的单像素样机,1997 年研制了 3×3 碲镉汞检测器阵列样机并进行了野外试验[27,28]。

1998 年,埃奇伍德研究工程和发展中心研制了 M34 综合生物检测系统(BIDS),系统实物图如图 6 所示[29]。同时,他们与休斯飞机公司合作研制出可调谐频率捷变 CO₂ 激光器(FAL)和先进检测算法的激光雷达系统(LSCD)[30]。LSCD 系统激光器脉冲重复频率为 200 Hz,占空比为 40%,输入功率低于 1 kW,可在包括 9P₄₄ 谱线在内的所有谱线上提供 100 mJ 以上的能量,系统接收孔径 25.4 cm,以地形测绘模式工作



图3 AN/KAS-1系统实物图

Fig. 3 Practical image of the AN/KAS-1 system



图4 M21型化学战剂报警系统

Fig. 4 Practical image of the M21 system



图5 M22 轻型防区外化学战剂检测器

Fig. 5 Practical image of the M22 system



图6 M34 综合生物检测系统

Fig. 6 Practical image of the M34 system

时侦检距离达 10 km^[30]。埃奇伍德研究工程和发展中心建造了另外两套 LSCD 系统,其中一台与法国合作研究使用,另一台用于与空军菲利普实验室、洛斯·阿拉莫斯国家实验室的机载激光雷达的合作研究。此后,埃奇伍德研究工程和发展中心还在研制供固定设施和舰载应用的、可大面积侦察的激光雷达系统(JSCWILD),如图 7 所示。该系统是使用差分吸收和差分散射激光雷达模式的距离分辨激光雷达,可扫描大气和地面,检测化学蒸气以及空中的液体和颗粒,使用脉冲重复频率 100 Hz、1 J 级的激光器和 61 cm 口径的光学系统,以半球扫描模式,可在 5~7 km 距离实现距离分辨,使用较高的脉冲能量和较大的光学系统时,作用距离可达 20 km^[31,32]。



图7 JSCWILD系统

Fig. 7 Image of the JSCWILD system

此外,美国分别先后开展了远距离防区外生物战剂检测系统计划(LR-BSDS)和短距离防区外生物检测系统计划(SR-BSDS)^[33,34]。其中 LR-BSDS 主要开发红外远程检测装置,SR-BSDS 主要开发紫外激光诱导荧光装置。LR-BSDS 计划,洛斯·阿拉莫斯国家实验室建造了3套 XM94 LR-BSDS 系统,以迅速形成临时性的生物战剂侦检能力。XM94 LR-BSDS 系统采用脉冲能量 420 mJ、脉冲重复频率 20 Hz 的 Nd:YAG 激光器,48.3 cm 抛物面主镜和 8.13 cm 副镜的卡塞格林望远镜,利用硅雪崩光电二极管检测回波能量,通过测量弹性后向散射信号提供生物战剂气溶胶云的浓度、距离等信息,系统实物图如图 8 所示^[35]。XM94 LR-BSDS 系统重 590 kg,体积 3 m³,安装在 UH-60 直升机上,并在机上完成信号处理。直升机垂直于风向飞

行,激光雷达垂直扫描,可检测并跟踪最远达 30 km 的模拟线源生物气溶胶云^[35]。

按照 SR-BSDS 计划,Fibertek 公司制造了基于激光诱导荧光光谱检测原理的激光雷达系统,采用两台紫外激光器和一台红外激光器,能在 310~445 nm 范围内检测,作用距离达 3 km,系统实物图如图 9 所示。美国陆军化学和生物防御司令部已在野外进行了试验,用以探讨系统性能和人体安全问题^[34,36]。为了支持这项计划,SRI 国际公司制造了专用的高分辨率分光计。该分光计采用脉冲能量为 1~10 mJ、脉宽为 3~8 ns、发散角小于 1 mrad、在 220~345 nm 波长范围连续可调的紫外激励激光源,将双光栅 Czerny-Turner 单色仪和光电倍增管相结合检测荧光,测量激光导致的气溶胶化生物战剂的荧光横截面。



图 8 XM94 LR-BSDS 系统

Fig. 8 Image of the XM94 LR-BSDS system



图 9 SR-BSDS 系统

Fig. 9 Image of the SR-BSDS system

按照美国国防部高级研究计划局的研究合同,EOO 公司正在研制紧凑的红外/紫外混合激光雷达系统,系统设计利用二极管抽运 Nd:YAG 激光器产生的 $1.064 \mu\text{m}$ 激光,进行弹性后向散射测量,检测生物战剂气溶胶云的位置、形状、大小,并利用多普勒检测边缘滤波技术确定风向和风速;通过将 $1.064 \mu\text{m}$ 红外激光 4 倍频成 $0.266 \mu\text{m}$ 的紫外激光,进行生物战剂气溶胶云感应荧光的侦检^[36,37]。该系统最终的目标是研制出战术无人机载激光雷达系统样机,预计样机重量 34 kg,体积 0.0425 m^3 ,功率需求小于 500 W。目前设计的实验室型系统,计划测量气溶胶浓度的距离为 5 km,以 1 m/s 的分辨率测量风场的距离为 2 km,测量荧光的距离大于 1 km。

4.2 俄罗斯

1990 年,俄罗斯批量生产了 KDKhR-1N 型化学战剂激光检测系统,实物图如图 10 所示。系统以 MT-LB 两栖装甲车为工作平台,主要器件包括 IMD-21B 测量仪、GSA-12 自动化学战剂感应装置、PGO-11 半自动化学战剂感应装置和 KPO-1 检测采样器^[37~39]。KDKhR-1N 系统的激光传感器可通过光谱吸收分析来扫描并检测距离 1~3 km 处的毒剂云团,车内携带的一台计算机控制系统能让操作者测出毒剂云团的距离、大小和形状以及在地面上空的运动速度和方向。系统的主要性能参数如表 1 所示。

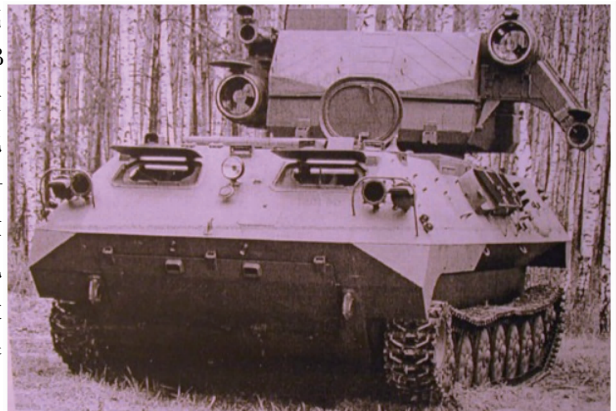


图 10 KDKhR-1N 型化学战剂激光检测系统

Fig. 10 Image of the KDKhR-1N system

俄罗斯还研制了 RKhM-4-01 型化学战剂激光侦检系统,系统以 BTR-80 装甲车为工作平台,主要器件包括 IMD-21B (IMD-1r) 测量仪、GSA-13 自动化学战剂感应装置、PGO-11 半自动化学战剂感应装置、KPO-1 采样器、DP-5V 测量仪、VPKhR 化学战剂感应装置、MK-3M 气象检测装置、KZO-2 警报发射装置、TNA-4-4 坦克导航设备等^[38,39]。

表 1 KDKhR-1N 型化学战剂激光检测系统性能参数
Table 1 Performance parameters of the KDKhR-1N system

Basic specification	Performance
Near-ground atmosphere area, covered in one scanning cycle /km ²	up to 75
Scanning cycle /s	60
Automatic surveillance mode operation /h	130
Time required for transmitting chemical agent cloud coordinates in the topographical coordinate system from the moment the cloud is detected /s	10
Non-stop operation after a 500 km march without refueling /h	3
Azimuth scanning angle /(^{\circ})	0~360
Scanning speed /[^{\circ}/s]	6
Elevation operational angle /(^{\circ})	-3~+70
Range and depth detection error /m	±30
Crew	3

4.3 欧洲

1988 年,法国和美国合作发展 MIRELA 化学战剂激光检测系统,研制了过渡性硬件并进行了试验,为进一步发展提供了数据^[38,39]。在 MIRELA 系统的基础上,法国研制了以距离分辨双 CO₂ 激光器为基础的差分吸收激光雷达系统(DETADIS),并进行了野外试验。DETADIS 采用 2 台 TEA CO₂ 激光器作为光源,可在 9~11 μm 之间调谐,激光脉冲能量 30 mJ,重复频率 10 Hz,接收望远镜口径 160 mm,光电检测器为冷却状态下的 HgCdTe,观测方位角 120°,垂直观测角 30°,对气态毒剂的作用距离 3 km,灵敏度值低于毒剂的阈值^[39,40]。DETADIS 利用可编程伺服马达驱动的扫描器完成半球扫描,采用高速直接检测接收机,可在 1~2 km 的距离内检测化学蒸气烟羽,测绘烟羽的移动和扩散,获得了约 20 m 的距离分辨率。

德国 Hungarian 公司研制了一种供野外用的差分吸收激光雷达检测系统 VTB-1,主要包括光源、卡塞格林望远镜、迈克耳孙干涉仪、低噪声前置放大器和带通滤光器等部分,系统结构如图 11 所示^[40,41]。图中,L₁ 和 L₂ 为两个连续波可调谐 CO₂ 激光器,功率约为 5 W,可在 9~11 μm 波段可调谐出 40 条谱线;Ch 为机械控制装置,激光器可旋转 360°,垂直活动范围为 15°~20°;M₁, M₂ 和 M₃ 为反射镜,M₄ 为光束控制镜,A 为衰减片,L 为 ZnSe 镜片,D 为液氮冷却条件下的 HgCdTe 检测器,T 为发射望远镜,S. P. 为信号检测单元。VTB-1 系统采用两端式配置,即将激光器置于一辆卡车上,而将一台人工反射器——1 m² 喷砂铝反射器安装于数千米之外的一个三脚架上,系统工作时,将装有激光器的卡车置于待检区域,在该区域内周期布放几个反射器,就可实施对待检区域的监测。VTB-1 系统可用于所有 G 类和 V 类神经毒剂气体的检测,灵敏度在 130~250 mg/m² 之间,作用距离 5 km^[40,41]。

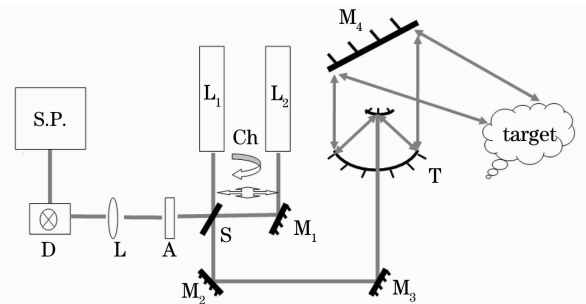


图 11 VTB-1 激光检测系统结构图

Fig. 11 Structure of the VTB-1 system

5 结束语

随着生化战剂对人类安全威胁的增强,尤其是近年来非军事领域和国际恐怖主义活动中生化战剂非法使用对社会公共安全潜在威胁的日益增加,全球各国都加强了生化战剂侦察报警和快速检测技术的研究力度。传统的接触式生化战剂检测手段时间长、速度慢、对防化人员安全威胁大。与之相比,激光检测方法具有非接触式、远距离、反应迅速、预警时间长和三维实时监控等优势,在生化战剂侦察报警和快速检测领域的应用范围正不断扩大,目前已经发展成为该领域的主要技术手段。伴随着多类型生化战剂激光侦检装备的应用,激光检测方法未来将在生化战剂侦察报警和快速检测领域发挥更大的作用。

参 考 文 献

- 1 Brian M. Paddle. Biosensors for chemical and biological agents of defence interest[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 1996, **11**(11): 1079~1113
- 2 K. Teschke, W. Ahrens, A. E. Andersen *et al.*. Occupational exposure to chemical and biological agents in the nonproduction departments of pulp, paper, and paper product mills: an international study[J]. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1999, **60**(1): 73~83
- 3 Ellen Raber, Alfred Jin, Kathleen Noonan *et al.*. Decontamination issues for chemical and biological warfare agents: how clean is clean enough? [J]. *Int. J. Environ. Health Res.*, 2001, **11**(2): 128~148
- 4 J. Boleij, E. Buringh, D. Heederik *et al.*. Occupational Hygiene of Chemical and Biological Agents[M]. New York: Elsevier, 1995. 1~23
- 5 Michigan Department of Community Health Sarin Fact Sheet in Chinese [EB/OL]. [http:// www. michigan. gov/ documents/Sarin_Fact_Sheet_Chinese_142792_7. pdf](http://www.michigan.gov/documents/Sarin_Fact_Sheet_Chinese_142792_7.pdf)
- 6 Yang Ruifu. Anthrax spore bio- terrorism and related problems [J]. *Bulletin of the Academy of Military Medical Sciences*, 2002, **26**(1): 1~4
杨瑞馥. 炭疽芽孢恐怖及其相关问题 [J]. 军事医学科学院院刊, 2002, **26**(1): 1~4
- 7 Cao Qiusheng. Detection of chemical warfare agents and lidar[J]. *Electronic and Electro-Optical Systems*, 2011, (3): 1~4
曹秋生. 化学/生物战剂探测与激光雷达[J]. 电光系统, 2011, (3): 1~4
- 8 John P. Carrico. Chemical-biological defense remote sensing: what's happening [C]. *SPIE*, 1998, **3383**: 45~52
- 9 Liang Xihui, Ou Weineng, Ren Hao *et al.*. Laser-induced fluorescence detection technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 65~68
梁锡辉, 区伟能, 任 豪 等. 激光诱导荧光检测技术[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(1): 65~68
- 10 Luo Zhenkun, Wang Qiuha. Lidar detection technology for chemical/biological agents [J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2011, **32**(1): 81~84
罗振坤, 王秋华. 化学/生物战剂激光雷达探测技术[J]. 医疗卫生装备, 2011, **32**(1): 81~84
- 11 Xia Zhiwei, Li Qi, Wang Qi. Simulation of coherent lidar range image restoration based on kalman filtering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(5): 051002
夏志伟, 李 琦, 王 骐. 基于卡尔曼滤波的相干激光雷达距离像复原仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(5): 051002
- 12 Lu Tongxing, Lu Yiqun. Principles and Application of Laser Spectrum Technology[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009. 116~134
陆同兴, 路轶群. 激光光谱技术原理及应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009. 116~134
- 13 Zeng Zhaoyang, Zhang Xiaoyong, Jia Xin. Measurement of linear frequency-modulated continuous-wave laser radar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(2): 022802
曾朝阳, 张晓永, 贾 鑫. 线性调频连续波激光雷达测量方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(2): 022802
- 14 Kong Weiguo, Chen Siying, Zhang Yinchao *et al.*. Threshold amendment and time-delay compensation of rotational Raman lidar for atmospheric temperature measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(2): 022801
孔卫国, 陈思颖, 张寅超 等. 基于转动拉曼测温激光雷达数据采集系统的阈值校正和延时补偿技术[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(2): 022801
- 15 Yan Jixiang, Gong Shunsheng, Liu Zhishen. Lidar for Monitoring Environmental [M]. Beijing: Science Press, 2001. 145~173
阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 145~173
- 16 Yan Aimin, Zhi Yanan, Sun Jianfeng *et al.*. Recent development of optical phased array scanning technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(10): 102801
闫爱民, 职亚楠, 孙建锋 等. 光学相控阵扫描技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(10): 102801
- 17 Shang Liping, Yang Renjie. The Fluorescence Spectroscopy Technology and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 2009. 22~25
尚丽平, 杨仁杰. 现场荧光光谱技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 22~25
- 18 John Ashcroft, Deborah J. Daniels, Sarah V. Hart. An Introduction to Biological Agent Detection Equipment for Emergency First Responders [R]. National Institute of Justice, 2001, 1~20
- 19 Dennis F. Flanagan. Detection of organic vapors with active and passive sensors: a comparison [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(23): 4253~4260

- 20 Dennis F. Flanigan. A short history of remote sensing of chemical agents[C]. *SPIE*, 1996, **2763**: 2~17
- 21 V. Vaicikauskas, V. Kabelka, Z. Kuprionis *et al.*. Infrared DIAL system for remote sensing of hazardous chemical agents [C]. *SPIE*, 2004, **5613**: 21~24
- 22 Arjun S. Bangalore, Gary W. Small, Roger J. Combs *et al.*. Automated detection of trichloroethylene by Fourier transform infrared remote sensing measurements [J]. *Anal. Chem.*, 1997, **69**(2): 118~129
- 23 Chemical Warfare Directional Detector (CWDD) [EB/OL]. http://electroni-cstechnician.tpub.com/12419/css/12419_30.htm
- 24 R. T. Kroutil, R. J. Combs, R. B. Knapp *et al.*. Infrared interferogram analysis for ammonia detection with passive FTIR spectrometry[C]. *SPIE*, 1996, **2763**: 86~102
- 25 M21 Remote Sensing Chemical Agent Alarm[EB/OL]. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/m21.htm>
- 26 Mutua J. Mattu, Gary W. Small. Quantitative analysis of bandpass-filtered Fourier transform infrared interferograms[J]. *Anal. Chem.*, 1995, **67**(13): 2269~2278
- 27 M22 Automatic Chemical Agent Detection Alarm (ACADA) [EB/OL]. <http://nj.gov/fmerpa/library/pdf/hsa/appe/FTM-021.pdf>
- 28 Clinton B. Carlisle, Jan E. van der Laan, Lewis W. Carr *et al.*. CO₂ laser-based differential absorption lidar system for range-resolved and long-range detection of chemical vapor plumes [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(27): 6187~6200
- 29 M31E1 Biological Integrated Detection System (BIDS) [EB/OL]. <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/land/bids.htm>
- 30 H. Riris, C. B. Carlisle, R. E. Warren *et al.*. Signal-to-noise ratio enhancement in frequency-modulation spectrometers by digital signal processing[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(2): 144~146
- 31 Army RDT & E Budget Item Justification (R-2 Exhibit) [EB/OL]. <http://www.dtic.mil/descriptivesum/Y2000/Army/0603790a.pdf>
- 32 Joint Services Lightweight Standoff Chemical Agent Detector (JSLSCAD) [EB/OL]. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/jslscad.htm>
- 33 Long Range Biological Standoff Detection System (LR-BSDS) [EB/OL]. <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/land/lr-bsds.htm>
- 34 Chemical/Biological Warfare Agents Photoelectric Detection Technology Development [EB/OL]. <http://www.defenseonline.com.cn/forces/bqdt/dt2000/dt200041.htm>
- 35 William Suliga, Ralph L. Burnham, Timothy Deely *et al.*. Short-range biological standoff detection system (SR-BSDS) [C]. *SPIE*, 1999, **3855**: 72~81
- 36 Army Detection Equipment [EB/OL]. http://chemicaldragon.com/yahoo_site_admin/assets/docs/CBRN_Equipment_Smart_Card.10615358.doc
- 37 L. J. Mullen. Hybrid LIDAR-radar: seeing through the scatter[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2000, **1**(3): 42~48
- 38 Xiao Cunjie. Foreign military chemical warfare agent detection equipment [J]. *J. Preventive Medicine*, 2008, **26**(3): 230~234
- 肖存杰. 外军化学战剂检测装备现况[J]. *解放军预防医学杂志*, 2008, **26**(3): 230~234
- 39 Biological Warfare [EB/OL]. <http://www.cbc.ca/news/background/bioweapons.html>
- 40 杨培根. 美国激光雷达的发展[EB/OL]. <http://www.defence.org.cn/article-1-43656.html>
- 41 VTB-1 Remote Chemical-Agent Sensor (Hungary), Detection (Sensor Systems): Chemical [EB/OL]. <http://articles.janes.com/articles/Janes-Nuclear-Biological-and-Chemical-Defence/VTB-1-remote-chemical-agent-sensor-Hungary.html>