

远程化学毒气红外探测告警技术进展

郑为建^{1,2}, 胡旭^{2,3}, 苏君红^{1,2}, 金伟其¹

(1.北京理工大学信息科学技术学院,北京 100081;2.昆明物理研究所,云南昆明 650223;
3.重庆大学通讯学院,重庆 400044)

摘要:随着红外探测器和数字信号处理技术的发展,远程毒气探测与告警技术已进入实用阶段。介绍了远程毒气红外探测与告警技术的进展和产品概况,对主动激光和被动红外光谱等两种手段进行了比较,提出了技术发展趋势。该技术对于战时防护、平时环境检测与反恐具有十分重要的意义。

关键词:红外; 化学毒气; 进展

中图分类号: TP732.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2006)05-0612-06

Development of standoff chemical agent infrared warning

ZHENG Wei-jian^{1,2}, HU Xu^{2,3}, SU Jun-hong^{1,2}, JIN Wei-qi¹

(1.College of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2.Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China; 3.Communication College, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The development and product of standoff chemical agent infrared warning were introduced. Active laser and passive infrared spectrum were compared, and the technology trend was pointed out. Its important meaning in the areas of battlefield shield, environment monitor and anti-terror in peace was intensified.

Key words: Infrared; Chemical agent; Trend

0 引言

第一次世界大战中,交战双方使用了化学武器。从此,化学毒气作为一种大规模杀伤武器,对人类生命构成了极大的威胁。尽管大多数国家缔结了禁止化学武器公约,但随着科学技术的发展,化学与生物毒气战剂一直没有被国际公约真正禁止,其种类和杀伤力有了很大的发展和提高。1999年南联盟战争中,交战方用精确制导武器袭击敌方化学品仓库和化工厂等,造成大面积环境灾难的“次生化学污染”等情况。平时期的化学和生物手段恐怖袭击属于极为恐怖

的大面积破坏行动,如1995年日本东京地铁的“沙林”毒气事件,与美国的炭疽病毒“白色粉末”事件,都引起了巨大的社会恐慌。因此,在战时化学与生物战毒气的远程探测与防护对于保护战斗单位的有生力量具有很重要的作用;平时期,对于环境检测与反恐也有重要作用。

由于有机磷化物和生物气雾剂在 $7.7\sim 14.3\ \mu\text{m}$ ($700\sim 1300\ \text{cm}^{-1}$)波段具有强烈的特征光谱带^[1,2],被动红外光谱仪器探测有机磷化物和其他许多有毒蒸气是目前最有效的手段。远程毒气红外探测与告警系统能以静态(士兵携带)、动态(车载、机载)模式工作,

收稿日期:2005-11-22; 修订日期:2005-12-28

作者简介:郑为建(1962-),男,福建福州人,研究员,博士生,主要从事红外技术。Email:13330465286@yn133165.com

在数千米甚至几十千米之外就可以发现敌方施放的化学毒气云团或地面污染区域。从而采取有效的处置措施,保护生命的安全。

1 技术进展和主要产品现状

利用光谱特征探测化学毒气的研究工作始于 20 世纪 50 年代初。根据各自的技术基础和军事需求,各国分别采取不同的技术途径进行远距离毒剂监测技术和方法的研究,其中物理手段有拉曼散射、红外吸收、紫外、微波和荧光法等,在近距离的毒气探测上都有应用。而在化学毒剂远距离监测方面,主要还是主动和被动红外光谱等两种手段^[3],有些已经装备。其中,美国的研究开发最为深入,50 多年来,美军的 Edgewood 研究发展工程中心(ERDEC)和陆军的化学研究开发工程中心(CRDEC)与多家研究单位和公司长期合作,研发了许多样机和产品;德国在被动红外光谱探测方面有若干产品;法国和俄罗斯在主动激光雷达探测方面进展较快,也有若干样机。目前,具有实际使用价值的是圆渐变滤光片(CSF)型光谱辐射计、热像仪改装的成像光谱辐射计^[4]、傅里叶光谱仪(FTS)、10.6 μm 的 CO_2 激光雷达等四种技术见表 1。

表 1 四种典型系统性能对照表

Tab.1 Specifications of four typical systems

Parameters	Circular variable filter radiometer	M21 Fourier transform spectroradiometer	Multi-channel radiometer	LIDAR
Spectral range/ μm	7~14	7~14	8~12	9.2~10.8 (60 lines)
Key technology	Circular variable filter &MCT detector	Michelson interferometer &MCT detector	288×4 MCT detector array & focal plane filter	TEA frequency agile laser CO_2 +MCT detector
Weight/kg	9.08	27.24	18.16	500
Range/km	<1	>3	2.5	4.8

1.1 红外遥测的早期研究

1948 年,麻省理工学院的 R.C. Lord 发表了 Sarin 毒气的红外吸收谱曲线。1965 年,美军 ERDEC 化学研

究实验室的 Dennis F. Flanigen 发表了几种主要化学毒剂(GA、GB、GD、VM、VX 等)蒸气相的定量光谱^[5]。这些工作为开展全面的气体远距离探测奠定了基础,有些数据一直沿用至今。

20 世纪 60 年代末、70 年代初,美军 ERDEC 主导了 LOPAIR 计划,起初对 PE 公司的实验室用棱镜光谱仪进行改造,在野外作了若干测试,接着研制了简单的 3/6 通道红外辐射计,基本组成是旋转滤光片、非制冷的红外探测器和简单的信号处理。由于红外探测器、高性能热像仪和红外光谱数据库技术的发展,大大提高了成像辐射计探测系统的作用距离和识别能力,且可用于运动中探测。1996 年,美国海军的 NVEOD 研制出采用低温制冷的 288×4 长波 MCT 型成像辐射计^[6]。在此技术基础上发展了海军的 AN/KAS-1 的辐射热成像前视红外系统,已装备在水面舰艇上。其原理(a)和主要结构(b)如图 1 所示。

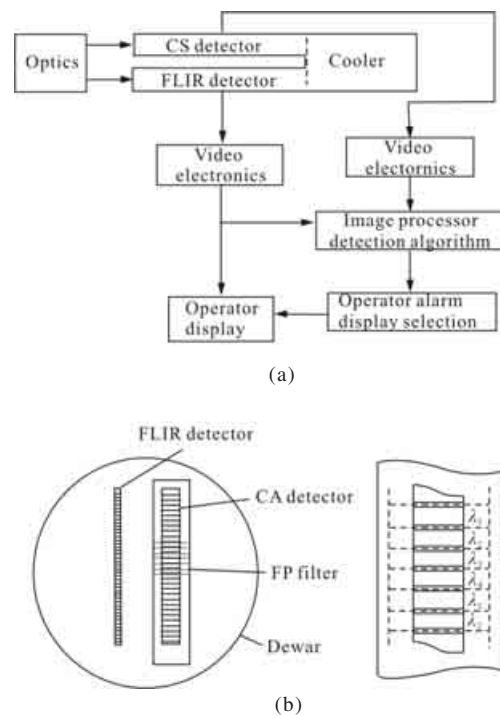


图 1 红外成像辐射计原理与滤波探测器结构示意图

Fig.1 Major system components of multispectral thermal imaging radiometer and structure of focal plane filtering detector

1.2 被动红外傅里叶探测原理

发射后的化学战剂可以看作是蒸气(Vapor)云团和气雾剂云团,而不是气体(Gas),由于电磁场和热激

发的振动-旋转,电子能级间发生能量交换,在红外区特别是在 7.6~14.3 μm (700~1 300 cm^{-1}) 波段发射或吸收红外热辐射,有着独特而强烈的光谱特征^[7],其形状和运动方向随风而变。因此,光谱和形状特征是远距离探测化学战剂的根本。另一方面,8~12 μm 波段是大部分军用红外系统工作的大气窗口。

被动红外技术基于目标云团和大气背景中自然存在的温差,引起的大气辐射吸收或辐射呈现出光谱特征,可以探测蒸气和气溶胶的神经毒气和糜烂性毒气。

差谱 ΔL 的辐射度由下式表示:

$$\Delta L = (1 - \tau_1) \tau_a (L_g - L_t)$$

式中: $\tau_1 = e^{-CL}$ 为云团透过率,表征了具有吸收系数 a 和 CL 浓度的云团特征; τ_a 为大气透过率; L_g 为背景或环境对应温度下的黑体辐射; L_t 为云团温度的黑体辐射。

显然,只要云团与背景或环境具有一定温差,一定浓度的毒剂在特征波长上就会产生辐射的差异。 ΔL 值很小,在吸收峰处约为 $10^{-8} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}$ 量级,是可以被傅里叶红外光谱仪探测的。

傅里叶变换 FTS 与成像光谱辐射计各有所长。成像光谱辐射计使用方便、直观,傅里叶变换 FTS 灵敏度与分辨率都比较好。尤其在野外远距离遥测应用中,充分发挥了傅里叶变换光谱仪的三大优点:

(1) 高通量(亚基若优点) 在迈克尔逊干涉仪出现之前的各种光谱仪,需要对通过狭缝的光束进行分束或者滤波,通过仪器的光通量衰减很大。而在迈克尔逊干涉仪中,采用了双光束干涉原理(如图 2 所示),当光程差变化时,进行了调频干涉,出口的光强度是入射光谱的傅里叶变换。能量只受光阑限制,不受狭缝大小或滤光材料的限制。

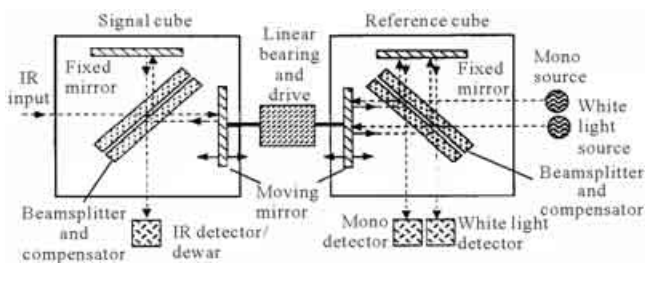


图 2 傅里叶红外光谱仪(FTIR)原理

Fig.2 Schematics of Fourier transform spectroradiometer

(2) 多重传输(费尔格优点) 其他的分光光度计,依次只能测一个光谱单元。傅里叶光谱仪虽然只用一个探测器单元,但可以同时得到所有的光谱频率与强度关系,能够显著提高信噪比。

(3) 高精度(孔雷优点) 只要动镜的位移确定,干涉图的强度即可确定。现代傅里叶光谱仪中用激光器能够辅助精确测量动镜的位移量,从而计算光谱波数得到很高的精确度。

傅里叶变换光谱仪的缺点是抗震性差,需要大量快速的实时计算。为此,在光学结构上产生了多种迈克尔逊干涉仪的变形。

1.3 被动红外傅里叶产品的技术发展

1979 年,美军开始了化学毒气遥测的 RSCAAL 计划,其核心技术是采用迈克尔逊干涉仪和制冷型光子红外探测器,成果反映在 XM21 上(如图 3 所示);1995 年,经过海湾战争现场的试验,Honeywell 公司获得批量生产 M21 型 FTS 远程毒气探测仪的合同,美国陆军批量装备 M21(XM21 的定型产品)。



图 3 RSCAAL 计划的 M21

Fig.3 M21 of RSCAAL

80 年代中期,为了满足移动车辆操作的需要,美军立项开发轻型遥测化学毒气探测器(LSCAD)(如图 4 和图 5 所示);其结构紧凑,响应速度快。20 世纪

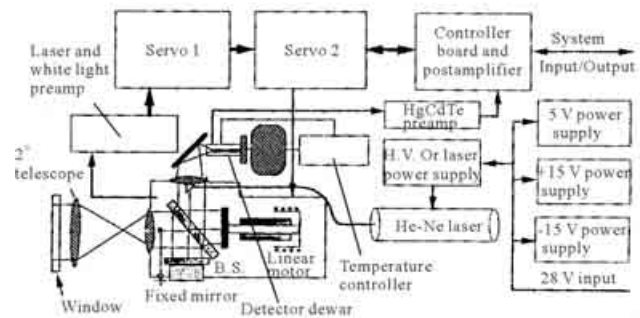


图 4 LSCAD 的系统框图^[8]

Fig.4 Block diagram of LSCAD system

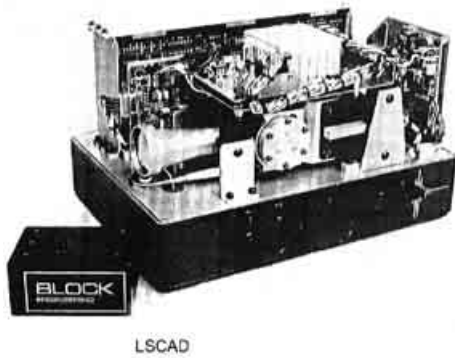


图 5 LSCAD 实物
Fig.5 LSCAD Sensor



图 8 加拿大 BOMEM 公司的 MR200
Fig.8 MR200 of BOMEM(Canada)

末,又将参考激光器从氦氖管改为半导体 LD,并使用了更高速的电子信号处理芯片,这就是改进的 LSCAD,简称 ILSCAD^[6]。目前,ILSCAD 已在各种移动平台上使用,如无人机、装甲侦察车等。

目前,除军用防化装备,有关的合作厂家也生产环境保护用的产品,如美国 Block Engineering 公司的 FTS100 型、FTS550 型(如图 6 所示)。德国 Bruker 公司的 OPAG22、OPAG33(其军品型号为 RAPID)(如图 7 所示)。加拿大 BOMEM 公司的 MR200(如图 8 所示)。表 2 示出国外典型被动红外遥感毒剂报警器性能比较。



图 6 美国 Block Engineering 公司的 FTS100 型、FTS550 型
Fig.6 FTS100 & FTS550 of Block Engineering (U.S)



图 7 德国 Bruker 公司的 OPAG22 与军用的 RAPID
Fig.7 Commercial FTS OPAG22 & military FTS RAPID of Bruker(Germany)

表 2 国外典型被动红外遥感毒剂报警器性能比较
Tab.2 Technical characteristics comparison of typical passive infrared remote sensors

Parameter	LSCAD	ILSCAD	FTS100	FTS 550	RAPID
Interferometer	Michelson	Michelson	Michelson	Michelson	Rocksolid
Spectral range / μm	7~14	7~14	7~13.5 /3~5	7~13 /3~5	7.7~14.3
Spectral resolution/ cm^{-1}	4,8,16	4,8,16	2,4,8,16	2,4,8	4,8,16
Field of view	$1.5^\circ \times 1.5^\circ$	$1.5^\circ \times 1.5^\circ$	$1.5^\circ \times 1.5^\circ$	$1^\circ \times 1^\circ$	$1.7^\circ \times 1.7^\circ$
NESR/ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	$<3.1 \times 10^{-9}$	$<3.1 \times 10^{-9}$	$<3.1 \times 10^{-9}$	$<3.1 \times 10^{-9}$	$<3.1 \times 10^{-9}$
Identify biology toxin	No	Partial	No	Partial	No
Detector	Signal MCT-PC	Signal MCT-PC	Signal MCT-PC	Signal MCT-PC	Signal MCT-PC
Detector size/ mm^2	0.5×0.5	0.5×0.5	0.5×0.5	0.5×0.5	1×1
Detector $D_\lambda/\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}$	$>4 \times 10^{10}$	$>4 \times 10^{10}$	$>4 \times 10^{10}$	$>4 \times 10^{10}$	$>4 \times 10^{10}$
NETD/ $^\circ\text{C}$	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05
Cooler	Closed cycle Stirling	Closed cycle Stirling	Closed cycle Stirling	Closed cycle Stirling	N_2 liquid /Stirling
Range/km	5~10	5~10	3~5	5~10	5
System power/W	<24	<20	<25	30	80
Value/ m^3	0.006 9	0.004 8	0.005 5	0.006 9	0.036 3
Weight/kg	<6	<4.5	~ 5.4	~ 13.6	23.5

1.4 主动红外激光雷达技术

被动红外探测技术需要的化学蒸气云团与大气背景存在自然温差,而且物理上无法对云团距离进行判断。因此,设想发射一束红外激光,通过化学物质的吸收情况进行判断。该手段对气溶胶、液滴毒剂比较有效,甚至对于地面污染、生物毒剂也有一定作用;这就是主动红外激光雷达技术^[9]。主要技术途径是:用横模 CO₂ 气体激光器,加上光栅振镜等调谐手段,产生感兴趣的谱线,目前,在 9.2~10.8 μm 内可以产生 60 条支线光谱脉冲激光。CO₂ 激光雷达有两种工作方式:一是对长程地物目标散射方式(DIAL);二是距离分辨的差分后向散射方式(DISC)。前者作用距离与被动红外的差不多,也无法得到云团的距离;后者作用距离可达 10 km。系统采用两台可调谐激光器,一台发出测量光束,另一台发出参考光束。系统最小重量 250 kg,一般要用卡车运送,如图 9 所示。表 3 列出主动激光侦毒方式与特点。

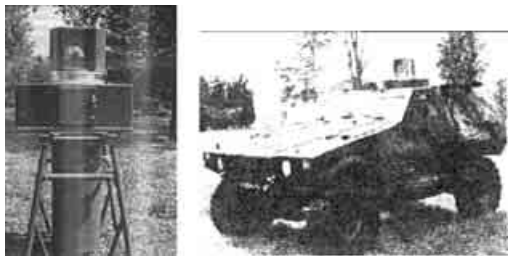


图 9 主动激光雷达 DATADIS 样机光学头与装车图

Fig.9 Optic part of active laser radar DATADIS and vehicle-borne picture

表 3 主动激光侦毒方式与特点

Tab.3 Active laser detection characteristics

Target	Operation mode	Technique character	Range	Remark
Vapours	DIAL	Differential absorption	5 km	Insensitive distance
Aerosols	DIAL、DISC	Differential scattering	1 km	Sensitive distance
Liquid pollution on ground	DISC	Differential scattering	0.5 km	Sensitive distance

1.5 技术方法比较评估

1977 年,美国国防部委托白沙导弹试验基地对

陆军化学研究开发工程中心(CRDEC)和陆军夜视和电-光局(NVEOD)的 FTS 和 FLIR 成像光谱辐射计探测系统进行了为期三周的性能比较试验和评判,FLIR 很远就可发现目标,但不能区分毒气和飞扬的尘土等干扰云团。当目标背景温差下降时,FTS 无法工作。二者性能在伯仲之间。最终,专家认为全自动告警型系统采用 FTS^[10];操作者参与系统可采用成像辐射计。1986 年和 1997 年,美国又组织了两次大型试验,对于各种被动红外系统与主动激光系统进行了评估试验,取得了更为详实的外场实验数据。

目前的两大主流技术分别是主动激光和被动红外,近年来国内外也达成一种共识,即主动激光系统和被动红外系统互相不能代替,只能取长补短,优势互补^[3]。

主动激光主要特点是:具有距离分辨能力;可监测蒸气态、气溶胶、液滴毒剂、地面污染以及生物毒剂;灵敏度高;作用距离远。但体积大、质量重、技术复杂性高、成本造价高、易被敌方发现。使用和后勤维护都不方便,野外使用寿命短。

被动红外系统主要特点是:体积小,质量轻,易操作,成本低,技术成熟;但对气溶胶和地面污染不太有效;且监测条件需要背景和云团具有一定的温差;只能监测视线内目标云团的平均浓度。

2 毒气探测技术发展趋势

技术延伸:由点线工作的傅里叶红外光谱技术扩展为成像傅里叶光谱仪,可以对面积分布和气体云团的运动趋势进行检测^[11]。还发展了无动镜扫描技术等。图 10 示出成像傅里叶光谱仪原理与样机。图 11 示出应用实例。

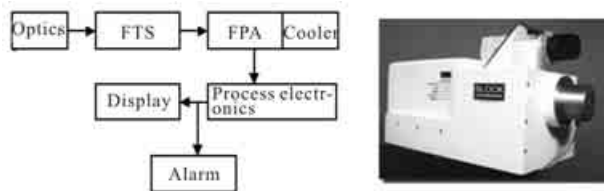


图 10 成像傅里叶光谱仪原理与样机

Fig.10 Diagram of imaging Fourier spectroradiometer and prototype(I-SPEC)

功能延伸:由只检G类毒剂,扩展为G类、H类等。在较近的距离,已有扩展的可疑生物毒剂告警功能。

性能延伸:由定性告警,发展到有限的定量分析。

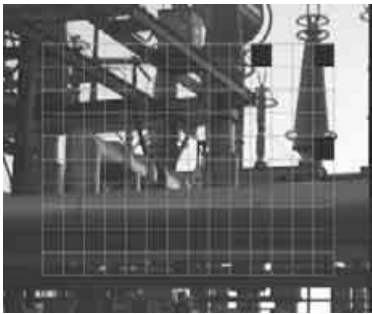


图 11 成像傅里叶光谱仪应用实例

Fig.11 Application of imaging Fourier spectroradiometer(I-SPEC)

如分析火山喷发的气体成分比例等。此外,为满足更快的状态分析,还发展了步进扫描技术等。

应用延伸:由三脚架静态工作使用,拓展到车载、机载动态工作模式,甚至上星载和无人机平台。

系统通用组件化、组合化趋势:美军 ILASCAD 在设计思想上按三军的不同防化要求设计成一个通用组件,可与红外热像仪、GPS 卫星定位仪、空间扫描系统等进行组合,以适应不同平台的使用要求。

3 结束语

远程毒气被动红外探测与告警是红外探测技术、激光雷达、红外光谱学及数据库、分析化学、数字图像实时处理、模拟与仿真技术的多学科综合性技术。

远程毒气红外被动探测与告警技术经过 40 多年的发展,已从实验室发展为野外应用。该技术正在从军事应用领域走向反恐、消防和环保等安全领域,通过其对有毒有害工业气体成分的识别,确定及时有效的应对措施,在未来将发挥重要的作用。

因此,发展远程毒气红外被动探测与告警技术,不仅对于国防建设,对公共安全、绿色环保建设,提高应对突发事件的控制能力,也都有重大意义。

参考文献:

- [1] BECK L. *Handbook of Remote Sensing: 2nd fascicule* [M]. Translated by TANG Ding-yuan, CHEN Ning-qiang. Beijing: National Defence Industrial Press (拉尔夫·贝克. 遥感手册: 第二分册. 汤定元, 陈宁镗, 译. 北京: 国防工业出版社), 1979.
- [2] ZHANG Jing-xian, LI Yu-dan, JIN Wei-qi. *The Technology of Glimmer and Infrared Image* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术. 北京: 北京理工大学出版社), 1995.
- [3] GRUBER T C, GRIM L B, DITILLO J T. Comparison of active and passive FTIR [C] // *Proceeding of SPIE, Electro-Optical Technology for Remote Chemical Detection and Identification II*, 1998, **3383**: 2-22.
- [4] ALTHOUSE M L. Spectral filtering of thermal imagers for gas detection [C] // *Proc 3rd Int Symp Protection against Chemical Warfare Agents*, 1989.
- [5] FLANIGAN D F, DELONG H P. Spectral absorption characteristics the major components of dust clouds [J]. *Applied Optics*, 1971, **10**(1): 51-57.
- [6] CARR L W, FLETCHER L, HOLLAND P L, et al. Characterization of filtered FLIR systems designed for chemical vapor detection and mapping [C] // *Proceeding of SPIE, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing*, 1990, **1309**: 90-103
- [7] WALTER H, FLANIGAN D. Detection of atmospheric pollutants: a correlation technique [J]. *Appl Opt*, 1975, **14**(6): 1423-1428.
- [8] ALTHOUSE M L. The lightweight standoff chemical agent detector (LSCAD) [C] // *Proc 5th Int Symp Protection against Chemical Warfare Agents*, 1995.
- [9] ADAM P. Remote active and passive detection sensors of CW agents [C] // *Proceedings of the 5th CBW protection symposium*, 1995: 67-72.
- [10] COOPER D E, RIRIS H, VAN der LAAN J E. Frequency modulation spectrometers for chemical sensing of the environment. [C] // *Proceeding of SPIE, Measurement of Atmospheric Gases*, 1991, **1433**: 120-127.
- [11] PRITT A T Jr, KUPFERMAN P N, YOUNG S J, et al. Imaging-LWIR spectrometers for remote sensing applications [C] // *Proceeding of SPIE, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing VIII*, 1997, **3063**: 138-149.