

长距离红外激光照明主动成像系统研究

杨玉兰^{1,2}, 孙金霞¹, 付国柱¹

(1. 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130031; 2. 北方彩晶集团有限公司, 长春 130033)

摘要: 红外激光照明成像系统克服了被动热成像系统成像对比度低、作用距离短等缺点, 在全天候目标探测和识别中有着广泛的应用潜力。本文阐述了主动照明成像系统的工作原理, 详细分析了影响成像质量的因素及解决方法。

关键词: 激光照明; 主动成像; 斑纹效应; 后向散射; 距离选通

中图分类号: TN2

文献标识码: A

文章编号: 1672 - 9870 (2009) 01 - 0018 - 04

Research on Long-rang Laser Illuminated Active Imaging System

YANG Yulan^{1,2}, SUN Jinxia¹, FU Guozhu¹

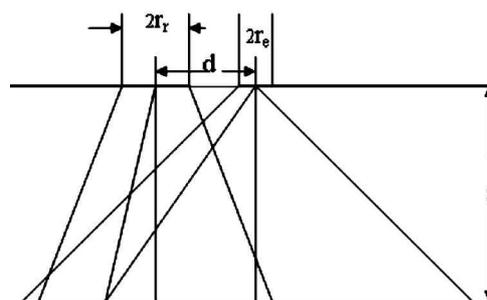
(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031;
2.North Caijing Group Ltd, Co, Changchun 130033)

Abstract: IR laser illuminated active imaging system overcomes the shortcomings of the thermal passive imaging system in imaging contrast and detection range, the laser illuminated imaging system can be applied to aim detection and identifying system all-weather. The paper elaborates the work theory of the active imaging system, particularly analyzes effect factor of imaging quality and solution.

Key words: laser illumination; active imaging; speckle effects; back-scattering; range-gated

红外成像系统是运用物体自然发射的红外辐射或运用不同物体对红外辐射的不同反射率而进行成像的, 可以分为主动式红外激光照明主动成像系统和被动式热成像系统。传统的微光和红外热成像系统相对于主动式红外激光照明系统而言, 虽然具有隐蔽性好的优点, 但系统的有效作用距离会受到天空背景照度、气象条件、目标温度及对比度等条件限制, 长距离探测成像质量较差。主动式红外激光照明成像系统是利用红外激光来照明目标, 从而克服了被动式成像系统的条件限制, 可以实现在全天候探测和识别目标。相对于被动式成像系统, 主动式红外激光照明成像系统的成像质量虽有明显提高, 但在恶劣的天气环境中, 系统的成像质量和有效作用距离也会受到相干光照射引起的斑纹噪声和大气后向散射等因素的影响。

1 系统简介



d 照明系统和接收系统间距 r_e 发射扩束镜半径 r_r 接收光学系统半径 s 激光器与目标之间的距离。

图1 主动成像系统理论模型

Fig.1 Theory model of active imaging system

红外激光照明主动成像系统的工作原理类似于激光雷达系统, 因而可以将其看作为简化形式的激光雷达系统。该系统主要由发射系统和接收系统两

收稿日期: 2008-10-05

基金项目: 国家 863 计划项目 (2007AA122110)、国家自然科学基金项目 (60507003) 及中国科学院国防科技创新基金项目

作者简介: 杨玉兰 (1974-), 女, 工程师, 硕士研究生, 主要从事激光照明成像系统研究。E-mail: yylyang@126.com.

部分组成,如图 1 所示。通过调节发射光束的发散角,将目标的全部或关键部位照亮。用探测系统接收物体的反射回波,经过信息处理后就可以实现对目标的识别和探测。

2 主动成像系统传递函数分析^[1]

主动成像系统传递函数就是成像系统的传递调制度的能力,调制度取决于对比度(即图像的清晰度取决于图像的对比度),而图像的对比度又和目标及背景的对比有关。调制度的通常表示为:

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

其中 I_{\max} 为目标或影像的最大亮度 I_{\min} 为目标或影像的最小亮度。

被动式红外成像系统调制度受目标对比、大气、光学系统及杂光等因素影响,调制度表达式可以表示为:

$$M_{\text{信号}} = M_{\text{目标}} \times M_{\text{大气}} \times M_{\text{光学系统}} \times M_{\text{杂光}} \times M_{\text{CCD}} \times \frac{4}{\pi} \quad (2)$$

(1) 目标对比

设在自然条件下目标对比, $C = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = 2$,

则:

$$M_{\text{目标}} = \frac{C-1}{C+1} = 0.33 \quad (3)$$

(2) 大气影响

用反衬度来表示大气粒子的前向散射作用造成的目标对比度降低效应。目标对比为 2,反衬度则为:

$$C_0 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\min}} = C - 1 = 1 \quad (4)$$

经过大气后的目标反衬度为:

$$C_R = C_0 \times \exp[-\sigma H] \quad (5)$$

其中 σ 为大气衰减系数。取 $H=1\text{km}$,能见度为 8km 时 $\sigma=0.4\text{km}^{-1}$,则 $C_R=0.67$ 。

根据式(4)可推理出目标对比度=反衬度+1,则经大气后的目标对比关系式为:

$$C = C_R + 1 \quad (6)$$

故经大气后的目标对比为: $C = C_R + 1 = 1.67$ 。

经过大气后对比为 2:1 的目标调制度为:

$$M_{\text{目标}} \times M_{\text{大气}} = \frac{C-1}{C+1} = 0.25 \quad (7)$$

(3) 光学系统影响

光学系统的调制度受到加工工艺、系统设计及衍射光学元件的影响基本在一稳定值范围,根据资料查证^[1],光学系统调制度基本保证在 0.45 以上。故取:

$$M_{\text{光学系统}} = M_{\text{衍射}} \times M_{\text{设计}} \times M_{\text{加工}} = 0.45 \quad (8)$$

(4) 杂光影响

将视场内的使成像对比度下降的光看作杂光。到达探测器靶面上的成像光束的图像调制度为:

$$M_{\text{靶面}} = M_{\text{目标}} \times M_{\text{大气}} \times M_{\text{光学系统}} = 0.1125 \quad (9)$$

相应的靶面对比为:

$$C_{\text{靶面}} = \frac{1 + M_{\text{靶面}}}{1 - M_{\text{靶面}}} = 1.254 \quad (10)$$

要求杂光亮度的平均值不大于 $G=5\%$ (G 为杂光系数),则杂光后的调制度为:

$$M'_{\text{靶面}} = \frac{C_{\text{靶面}} - 1}{C_{\text{靶面}} + 1 + 2G} = 0.108 \quad (11)$$

其中 $G = \frac{I_G}{I_{\min}}$ I_G 为像面上杂光的平均强度,相应得到:

$$M_{\text{杂光}} = \frac{M'_{\text{靶面}}}{M_{\text{靶面}}} = 0.96 \quad (12)$$

(5) 探测器影响

目前常用的 CCD 探测器调制度可达 70% 以上,而数字摄像机可达 80% 以上。因此,本文中取探测器调制度的最低值 $M_{\text{CCD}}=0.7$ 。

故经上述系列计算,最终算得 $M_{\text{信号}}$ 为:

$$M_{\text{信号}} = M_{\text{目标}} \times M_{\text{大气}} \times M_{\text{光学系统}} \times M_{\text{杂光}} \times M_{\text{CCD}} \times \frac{4}{\pi} = 0.25 \times 0.45 \times 0.96 \times 0.7 \times \frac{4}{\pi} = 0.096 \quad (13)$$

由 $M_{\text{信号}}$ 可计算出 $C_{\text{信号}}$ 和 $C_{\text{反衬}}$ 为:

$$C_{\text{信号}} = \frac{1 + M_{\text{信号}}}{1 - M_{\text{信号}}} = 1.21 \quad (14)$$

$$C_{\text{反衬}} = C_{\text{信号}} - 1 = 0.21 \quad (15)$$

以上为被动成像系统的调制度计算过程。当采用激光照明后,目标自身对比度提高。取目标自身对比度为 4:1,同时将大气对照明光束的散射作用引起的能够进入探测系统的后向散射光算入影响成像质量的杂光中,计算得到

$$M_{\text{信号}} = 0.194$$

$$C_{\text{信号}} = 1.48$$

$$C_{\text{反衬}} = 0.48$$

由此可见,利用激光主动照明后,相对无照明系统,接收信号的对比度有所提高,但同时后向散射光造成的背景光增强也存在影响。

3 成像质量影响因素及解决方法分析

影响红外激光照明主动成像系统作用距离的主要因素有:大气湍流、相干斑纹噪声、大气粒子散射以及照明激光的能量等,长斜路径上的大气湍流会使图像产生畸变和非等晕效应,回波信号的相干干涉也会使图像产生斑纹状的强度分布。探测系统

所能够接收到的光强，同作用距离的平方成反比，因而增大照明光强可以明显提高系统的作用距离，但同时被大气粒子后向散射作用所散射进入探测系统的杂光也将会随之增强，甚至湮没物体的回波信号。为了克服大气湍流、斑纹噪声和后向散射杂光对成像质量的影响，人们做了许多的研究，例如 David Dayton^[2] 等人所采用的图像事后处理算法较好地克服了大气湍流所引入的畸变和斑纹噪声的影响，采用多光束组成的照明器^[3] 或者利用法拉第滤光器也能够降低斑纹噪声对红外激光照明主动成像系统的影响；距离选通技术则是解决大气粒子后向散射影响的有效途径。

3.1 斑纹噪声

利用相干光照明的主动成像系统中所存在的斑纹噪声是由于物体粗糙表面散射的回波随机干涉，以及目标附近的大气扰动引入的位相畸变所造成的。由于回波信号的相干干涉也会使图像产生斑纹状的强度分布，从而降低图像的对比度，影响了成像质量。

3.1.1 图像事后处理算法

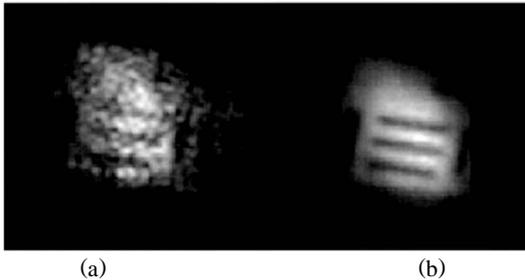


图2 3km 处的目标板图像：a) 单帧斑纹目标图像；b) 均值处理后的斑纹目标图像

Fig.2 Imaging of a portion of the 3km barchart target :
a) imaging of short exposure speckle ;
b) average of twenty speckled images

根据 David Dayton 等人在长距离红外激光照明主动成像的分析和验证中所提供的数据可以看到，对 3km 处的条带目标板单次曝光成像的结果中，斑纹噪声几乎湮没了条带板的结构（如图 2a 所示）。将一系列独立获得的斑纹图像的强度进行平均处理，可以得到长曝光的非相干图像。由于系统采用扫描成像结构，在进行图像平均处理之前要适当的补偿大气斜程不同的影响，这就是图像事后处理算法的实质。具体过程：即首先将第二张斑纹图像与第一张斑纹图像做相关处理，根据两张图像的相关峰值给第二张图像适当的平移后，进行强度平均处理；然后将第三张斑纹图像与上面得到的平均图像

再相关后，根据相关峰值给第三张图像一定的平移量，然后进行能量平均处理；以同样方式处理其余的斑纹图像，此为图像后处理算法。将 20 幅斑纹图像按照上述方法处理之后，其结果如图 2b 所示，可以看到斑纹噪声得到了有效的抑制。

3.1.2 多光束照明器降低斑纹噪声

C.Higgs 和 H.T.Barday 提出采用多光束照明替代单光束照明的方法来减小斑纹噪声对成像质量的影响，如图 3 和图 4 所示。该方法的基本思想是利用多个非相干激光束替代单光束照明，对单光束进行分束处理，产生的多束非相干光束经过不同的大气路径到达目标表面。由于每束光的照明方式不同，多束非相干光相互叠加，使目标得以均匀照明，从而降低了斑纹噪声对系统成像质量的影响。

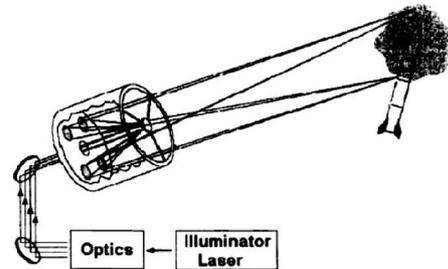


图3 多光束照明器原理

Fig.3 Theory of multibeam illumination

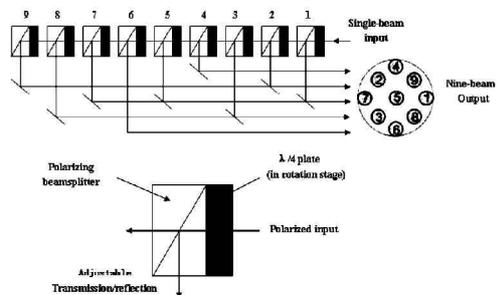


图4 多光束照明器和单结构

Fig.4 The multibeam illuminator configuration and detail of individual beamsplitter assembly

3.2 大气吸收和散射

大气对激光照明主动成像系统的影响主要为两个方面：一方面粒子的吸收造成传输能量的衰减，一方面大气粒子辐射和散射的光进入接收视场造成对比度下降；而且多次散射的多路径效应也使得系统分辨力和图像对比度下降，因而通常选择大气透过率较高的短波红外激光作为照明光源。在激光照明主动成像系统中，由于气体吸收激光衰减使得被照明物体应有对比度有所下降，而大气粒子对照明光束的前向散射却相应的使到达物体的光子有所增

加,因而前向散射在实际成像系统中有利于提高成像质量。由于平行光或点光源经成像系统后会在像面上形成艾利斑,视场内的气体粒子的后向散射光经成像系统后也会在像面上形成一定的弥散斑,这些散射光不仅使得原艾利斑的旁瓣有所扩展,而且旁瓣所含能量也相应增加,此时艾利斑的环形结构逐渐消失。旁瓣的扩展使得系统的分辨力下降,旁瓣能量的增加使得成像对比度下降。

消除后向散射对成像质量的影响方法主要分两种^[5],即非同轴激光照明方式和距离选通激光照明主动成像技术。图1所示的非同轴激光照明方式,是从空间角度考虑,将发射和接收系统相互分离,尽力减小照明光束和接收视场的交叠区域,从而使后向散射尽可能少的进入接收系统。但由于二者分离距离较大,大大增加了主动成像系统的体积,在很多场合不适用。距离选通技术是从时间上分离发射和接收过程,即发射激光脉冲时接收系统快门关闭,当目标回波到达接收系统时再打开快门,从而避免大气散射的影响,如图5所示。

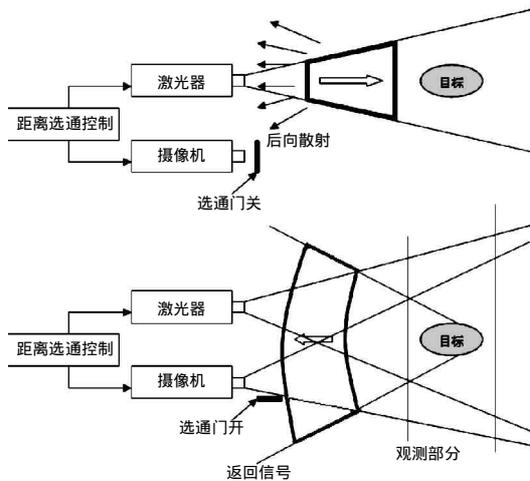


图5 距离选通主动成像原理^[5]

Fig.5 The principle of range-gated active imaging

4 结束语

长距激光照明主动成像系统对照明光源和探测器的选择具有比较高的要求。首先,照明光源要具有足够高的能量,大气穿透性能良好;其次,探测器对照明光源的量子响应要能够达到成像探测的要求;此外,系统结构的设计还需要考虑斑纹噪声和大气后向散射对成像质量的要求。国内对此类系统的研究还不是很深入,尚没有成型的系统出现。而美国和加拿大等国在许多年前就研制出了 ALBERDOS、ELIVESS 和 ATV 等长距红外激光照明主动成像系统。

红外激光照明主动成像系统的全天候工作,成像质量较高等特点使其不仅可以用于目标识别系统中,在自动导航、避障、地貌探测等系统中也有很大的应用潜力。除此之外,带有距离选通的红外激光照明主动成像系统的分辨力较高,可以将其应用于定位跟踪系统。在民用上,除可以用于恶劣环境下的搜索营救系统,也可以应用于汽车视觉增强系统。

参考文献

- [1] 王家骥,光学仪器总体设计[M]. 长春光机所内部教材, 2003.
- [2] David Dayton, Steve Browne, John Gonglewski. Long-range laser illuminated imaging: analysis and experimental demonstration [J]. Opt Eng, 2001, 40(6): 1001-1009.
- [3] Billman K W. Multibeam laser illuminator approach [J]. Proc SPIE, 1999, 3704: 206-215.
- [4] 黎全, 刘泽金, 陆启生. 斩波器调制照明光源的距离选通主动成像系统 [J]. 激光杂志, 2004, 25(6): 15-16.
- [5] Kevin J Snell, Andre Parent, Marc Levesque. An active range-gated near IRTV system for all-weather surveillance [J]. Proc SPIE 1997, 2935: 171-181.