

机载环境中激光选通成像技术的发展

● 刘晶红 徐美芳

摘要: 激光成像系统在一些应用中已逐渐普及。许多这样的系统依靠激光扫描和接收器搭建的系统获得图像。SELEX传感器和机载系统公司开发出一种带有二维焦平面阵列传感器的单脉冲激光选通成像系统。为了采集数据来评价这项技术在一些应用中的适应性,该系统已经展开现场试验。该试验系统用于表征和优化子系统及系统的性能,评估大气现象对系统性能的影响,以及获得在各种场景应用的现场数据。本文对最近增加的激光选通成像,或脉冲照明雷达 (BIL) 的系统和子系统及实验装置进行了描述,对依据现场试验经验而进行的激光子系统、传感器子系统和系统级集成方面的开发改造结果进行了讨论,在系统控制、数据和图像处理程序方面的改进同样做了说明。对从最近包括机载环境在内的现场试验操作获得的观察图像结果做了介绍和讨论。

1 引言

1.1 被动和激光选通成像

在许多应用中,人们越来越要求更大范围的高分辨率图像。Bakeretal 证明了红外被动成像在远距离目标识别上的局限性,长焦距下的高灵敏度和分辨率需要靠大孔径加上长的积分时间来解决,这会使系统质量和性能降低并显著增加成本。更复杂的问题是当这些系统在一个动态环境中(例如一个移动的平台)运行时,必须有稳定和瞄准系统。此外,被动热场景通常存在大量的前景和背景干扰;因此,热成像系统需要重要的数据和图像处理能力来提取和增强目标以方便显示或后续处理。

更高分辨率的图像可以利用短波获得,但是需要自然光源对场景照明,也因而限制了此类系统的使用。同时短波使得系统对大气湍流更加敏感,导致严重的图像退化。Carrano 已证明,图像处理技术来自于天文学,如散斑成像,通过调整和改进可解决上述问题。但这种系统不能 24 小时使用,并且图像背景噪声仍然很大。

短波红外 (SWIR) 激光选通成像在许多领域均受到关注,因为它提供了一种在没有诸多被动系统局限情况下获得远距离高分辨率图像的方法。探测器技术的最新进展是在二维焦平面阵列 (2D FPA) 基础上开发的激光成像传感器,其中省去了精确稳定,并通过单脉冲激光获取图像。一种解决办法是

脉冲照明雷达 (BIL), 这也是一种激光选通成像形式。SELEX S&AS BIL 系统完成的二维焦平面阵列近红外选通探测技术在 Baker 的文章中已进行了阐述。门控传感器子系统焦平面阵列使用碲汞镉 (CMT), 它工作在雪崩增益模式。在给定大小的孔径下, 通过应用短波红外激光选通成像技术, 可大幅度增加热像仪的性能。通过选择适当的照明激光波长, 可以利用普通的光学玻璃进行镜头设计, 从而消除大型红外光学元件和材料的相关费用。还可以在 $1.4\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 相对人眼安全的短波波段, 提供良好的大气传输。在长焦距小视场以及有限的频谱带宽条件下, 脉冲照明雷达 (BIL) (以下均简称 BIL) 系统相对于可见或近红外谱带成像系统可进一步简化光学设计, 降低成本。激光照明系统提供 24 小时成像能力。

1.2 BIL 操作和装备开发

BIL 系统的基本操作原理如图 1 所示。通过控制门控传感器, 使只有距离选通脉冲范围内的目标才被成像。所有返回的前景目标、中间大气层影响、反向散射和背景目标都被排除在图像采集过程之外。通过使用具有快速开关能力、集成在激光器中的短波雪崩光电二极管阵列, 加上快速时序控制电路, 该 BIL 系统能够从一个确切的距离选通脉冲范围内提取图像数据。这使得二维成像系统可以从复杂光学背景中提取目标, 大大减少了系统图像处理的复杂性和处理执行时间。在距离选通脉冲范围内, 可以提取一定距离的目标及目标前后的景物图像、目标细节。图 2 为一个实例。

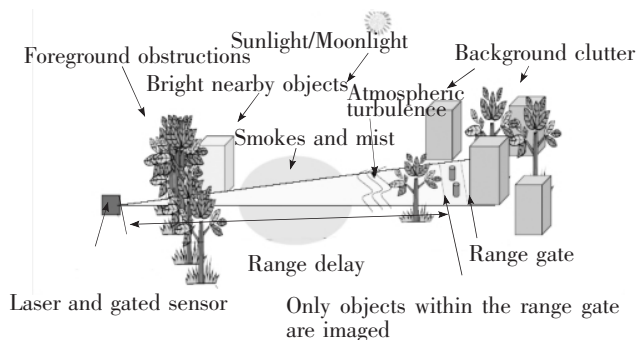


图 1 BIL 系统的基本原理

热像仪的积分时间为毫秒级, 视线抖动对其性能有重大影响。在主动成像模式下 BIL 传感器的曝光或者选通时间可以短至 10 ns。门宽一般 $<1\ \mu\text{s}$ 。短的选通时间放宽了实现辨别目标所需的系统的稳定条件。使用 20 ns 或者更短的短激光脉冲使得稳定问题进一步降低。短曝光时间“冻结”了任何系统或场景运动及大气湍流的影响。因而得到了短期曝光时间图像, 它保留了高空间频率内容的场景。

BIL 的开发测试装置已经生产, 利用二维主动成像的这些特性得到一个灵活的系统, 该系统是基于产品标准的子系统。自 2003 年底以来, 该 BIL 装置已由 Baker 等人进行了详细描述, 如图 3 所示。在英国和海外已广泛用于现场试验来采集数据, 以评估激光选通成像的效果。现场试验数据的分析为以后该技术的发展打下了基础, 以提高系统在地面和机载应用中的性能。

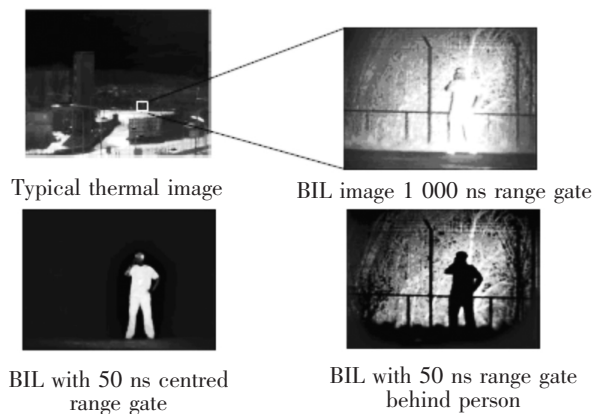


图 2 光学范围内利用距离选通脉冲控制提取目标实例

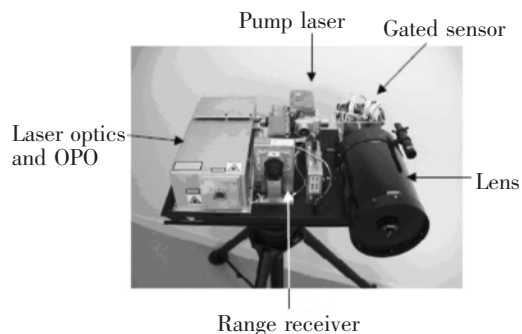


图 3 SELEX S&AS 的 BIL 开发及测试装置的初始构造

2 地基试验获得的经验

利用该系统进行了大量的地基试验。根据地形, 这些试验目标的距离往往限制为几公里。然而, 在稳定的激光脉冲能量下可以获得距离数十公里范围内的图像数据。这一性能是可能的, 原因在于 SWIR 选通接收器固有的高灵敏度和低噪音特性。低雪崩增益条件下可以达到几个光子水平的噪声, 并已被证实具有高灵敏度。

2.1 大气影响

该系统的开发受到了一定因素的限制, 通过地面试验证明, 这个因素就是大气湍流对图像质量的影响。短波红外 (SWIR) 闪烁的影响大于中波红外 (MWIR) 和长波红外 (LWIR)。使用激光照明可以促进这种影响, 因为激光照射后, 从目标反射回来的一个激光散斑图案, 它的特性是激光脉冲特性、目标结构及系统孔径的函数。然而, 在这些影响因素中, 主导因素是热对流引起的大气湍流。

在试验过程中, 边界层闪烁仪用来测量大气通路的折射率结构常数 C_n^2 , 以此表征湍流特性。图 4 显示了一些试验期中气候不同的 8 天 C_n^2 的变化。这些数据代表中纬度夏季至北部纬度秋/冬天气的大气数据。试验中图像数据和闪烁仪边界标记数据分析如图 4 所示, 它代表了对短波主动成像性能的强弱湍流影响的过渡区。当 $C_n^2 \sim 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ 及更大时, 大气湍流影响可能成为系统性能的限制因素。 $C_n^2 < 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 湍流影响较弱, 图像主要受相干照明和照明光子噪声产生的表面粗糙度散斑效应影响。

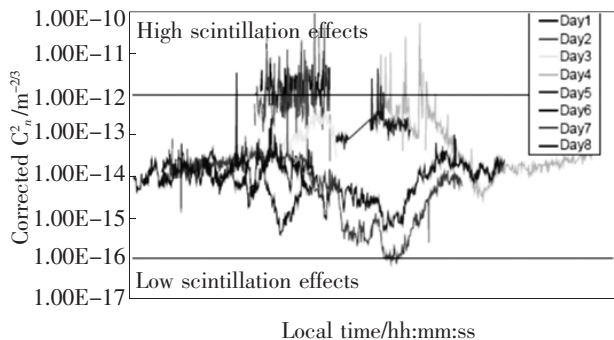


图 4 最近试验中折射率常数随时间的变化

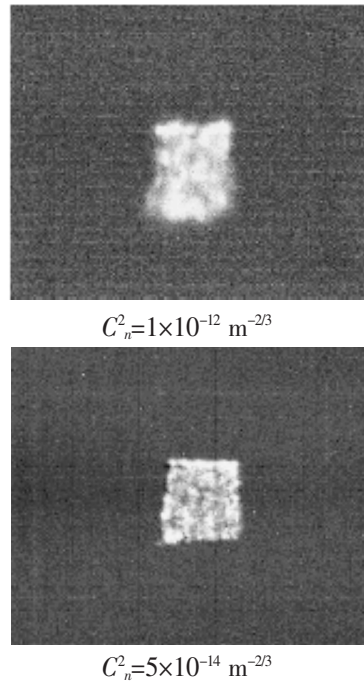


图 5 变化的大气湍流对图像质量的影响

闪烁给 BIL 系统所收集的图像带来了随机时间和空间噪声。这方面的例子如图 5 所示, 这些都是单脉冲图像显示的湍流对图像质量的影响。为了有效, BIL 系统必须在整个可能经历的大气条件范围内试验。Tokovinin 表明, 大气时间常数为几毫秒级; 因此, 在 BIL 系统的任何一个脉冲持续时间范围内, 大气为有效的静态。脉冲重复率为数十赫兹时, 数据帧之间的大气没有相关性。因此, 大气诱导噪声在帧间变化基础上是随机的。通过处理一些帧的图像数据有可能恢复掩盖的图像数据和补偿大气退化。

已经开发了算法来执行此处理。假设噪声抑制算法也包含图像增强功能, 补偿了粗糙湍流效应和视线运动所造成的帧之间未调整的图像移动。这些算法对 BIL 图像的影响如图 6 所示。左边的图片是一个单脉冲帧, 而右边的图像已经处理过。该算法开发利用了基于 GEDAE® 模型的开发环境。这提供了一个快速开发、评估、实施和部署的手段。最初开发此算法是用于 BIL 控制和处理的计算机实时操作系统。该算法现在已经嵌入在一个专门的处理卡

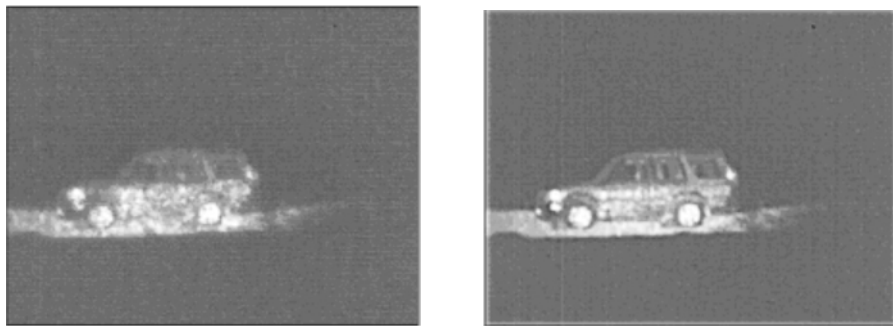


图6 利用SELEX S&AS算法对BIL数据进行处理

中,该卡还能够提供 BIL 系统的控制和接口功能。

2.2 三维数据提取

利用系统定时的精确性及传感器选通门快速的上升和下降时间,利用二维传感器提取三维数据是可能的。BIL 系统具有自动门扫描功能,可根据一个预定的步长在激光脉冲之间改变距离选通。通过一些激光脉冲创建一个数据立方体,在数据立方体

内,单个像素作为选通通路处理,数据帧作为强度图像处理。自动门扫描功能参数的设置是用户可选的,也可自动采集数据。图7为该过程的一个实例。以这种方式可以很容易实现距离分辨率 $<1\text{ m}$,用低脉冲重复频率的激光采集数据时间为几秒。对于一些地基应用相对静态场景,这一延迟完全可以接受。

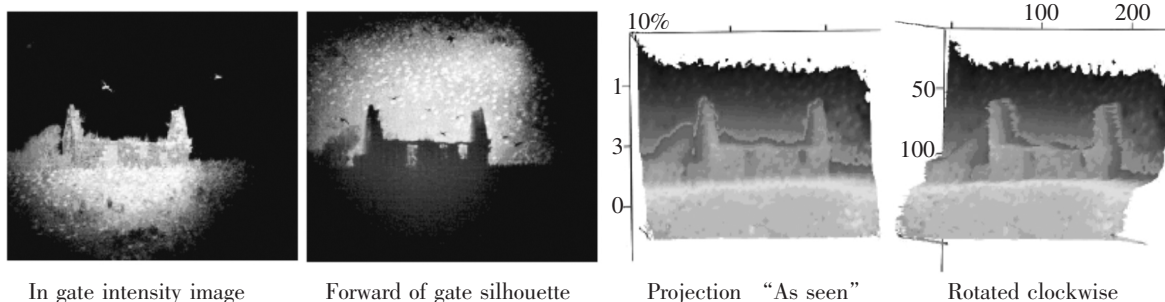


图7 使用目前的系统配置提取的“三维”数据

3 适合机载环境

3.1 机载操作

BIL 系统的一个基本应用是为机载平台提供远距离识别。为了支持系统机载环境的开发,2005年,在英国国防部和美国空军研究实验室、柯特兰空军基地的支持下,进行了一系列飞行试验。BIL 传感器和控制系统与一个稳定的成像系统集成在一架直升飞机上。在多个海拔范围内进行试验飞行,以此评价系统性能和运行情况。试验针对地面的固定和移动物体进行。

由于飞行系统配置,有必要修改 BIL 系统的控

制使得操作时不必进行激光测距初始化,它通常用来设置距离延迟。此外,由于该系统安装在动态平台上,选通延迟控制必须补偿帧间平台运动。这些要求可通过将 BIL 系统与 GPS 接收器集成得到满足。对目标所在地面进行勘查,以取得它们大致位置的有关资料。这些数据存储在 BIL 的选通控制系统中。飞行试验期间,依据平台位置测量自动计算距离延迟。GPS 系统用来在一定激光重复频率下输入平台位置,通过改变距离延迟补偿平台移动来维持地面上的距离选通。该项技术在此试验条件下被证明是可以接受的。

该模型的验证和算法开发作为地面试验的一部

分给了我们很大信心,该系统可以在机载环境下运行。剩下一个要关注的问题是机载环境中大气湍流的影响。Hufnagel-Valley 的模型预测,从高空观察地面,湍流影响将大大减少。据预测,沿倾斜路径至地面的综合效应将有一个有效的路径, C_n^2 远远低于在

地面上同样的水平路径长度。这是由于湍流随海拔高度迅速下降。此次飞行试验结果表明,大气湍流的影响仍然很大,而且高于系统模型的预期。在地面试验中开发的该算法适用于机载图像,甚至在剧烈湍流条件下也成功地复原了图像质量。实例如图8所示。

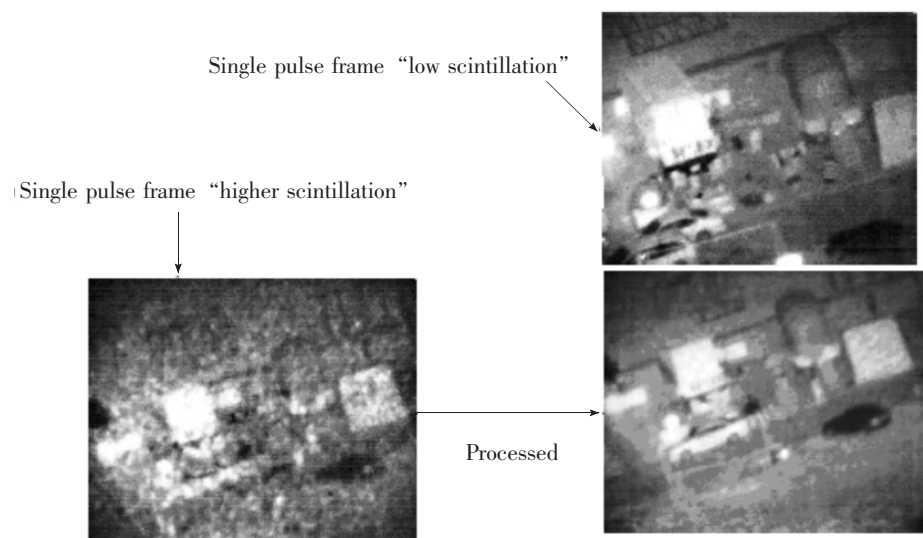


图8 强烈大气湍流对机载图像和复原图像质量的影响

3.2 选通宽度与距离延迟效应

自动选通扫描功能也在空中得到了证实。结果表明,当BIL系统自动补偿自身平台移动时,选通宽度可以受控制方式沿着地面移动。这种能力已被狭窄距离选通值证明。距离选通宽度和距离延迟时间在空气中的效应与沿水平视线获得的效应显著不同。这样的结果只是来自几何方面。然而,在地面试验中,选通延迟与选通宽度的改变只简单地根据系统距成像目标的远近来确定。机载条件下,选通宽度与距离延迟都会影响系统的视场。图像效果受与感兴趣目标区域相关的视线几何形状影响,需要仔细控制选通宽度和距离延迟误差,见图9。

为了保证图像传感器采集到整个视场的图像数据,需使激光发散角足够大,或照射整个感兴趣目标区域,因此,最小的选通宽度必须满足

$$\text{GateWidth}_{\min} = (R_1 - R_2) \times 2/c \quad (1)$$

选通宽度设定后,采集相关系统视场的图像数据主要受距离延迟误差控制。当选通宽度设置为最小值

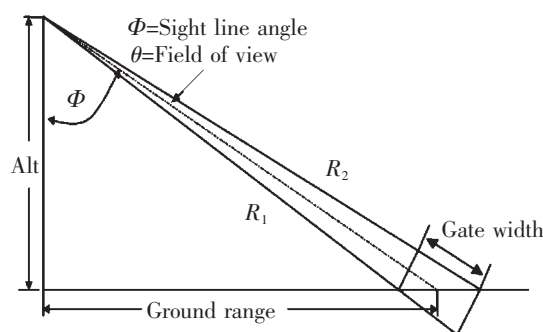


图9 与选通宽度和选通延迟相关的机载几何学

时,距离延迟必须满足

$$\text{RangeDelay}_{\max} = R_{\min} \times 2/c \quad (2)$$

其中 R_{\min} 等效于 R_1 。注意 R_{\min} 的位置在视场内的变化依赖于公式中几何参数的变化。

任何其他数值将导致系统视场范围内的图像截断。这些影响在飞行测试试验中已经得到证明。实例如图10所示。有效成像选通的近似 R_1 和 R_2 的位置如图所示,角度是未修正图像旋转造成的,请注

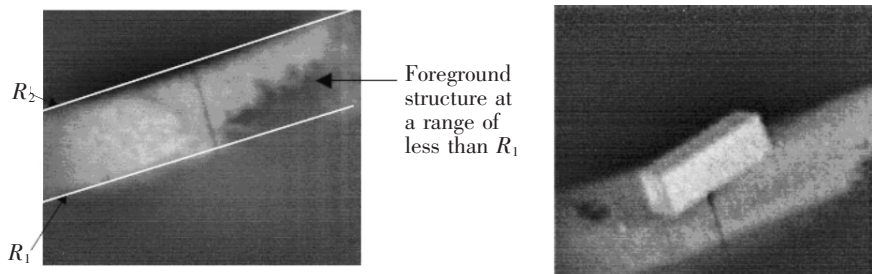


图 10 两帧图像证明了距离延迟和选通宽度对系统视场的影响

意选通边缘锐化。

3.3 模型验证-辐射评估

机载飞行试验已被用来确定机载 BIL 系统的辐射模型。入射到高斯激光束中心一个像素上的光子从扩展朗伯表面反射,其数量由方程 3 给出,其中的参数在表 1 中定义。

$$ph_{peak} = \frac{l_{pitch}^2}{F^2} \cdot \frac{E_l}{E_{phot}} \cdot \tau_{rx} \cdot \frac{\rho_{tar}}{\pi (\phi e \cdot R)^2} \cdot e^{-2\sigma_{atm} R} \quad (3)$$

对试验数据进行了分析,发现了一幅图像中返回信号光子的平均水平。从不同的倾斜范围获得的平均信号水平以及由方程(3)预测的理论光子水平绘制在图 11(a)中。图 11(a)中的试验数据和理论数据具有较好的一致性。测得的数据涵盖了不同的气候条件、日期、一天中的时间、倾斜范围和高度。

图 11(b)展示了所用相机的系统信噪比(SNR)、光子噪声和相应的测量信噪比。理论数据与测量数据再次表现出良好的一致性。

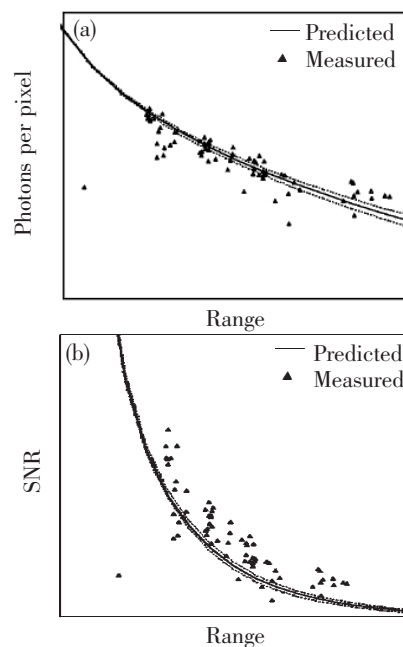


图 11 (a) 平均信号光子 (b) 信号信噪比

3.4 模型验证-分辨率

在飞行试验过程中,系统分辨率是通过场景测试图分析和从图像数据得到的边缘传递函数的高斯近似值来评价的。这一数据被用于计算系统 MTF,如图 12 所示,同时展示的还有期望理论最大 MTF。

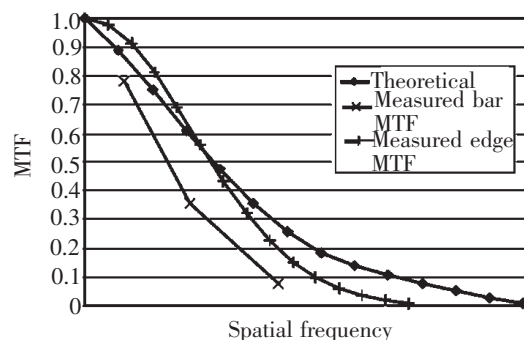


图 12 合成 MTF 图和理论最大值

表 1 信号参数值

Parameter symbol	Parameter name
l_{pitch}	Pixel pitch
F	Optical F number
E_l	Laser pulse energy (in free space)
ϕe	Beam divergence (full angle 1/e points)
E_{phot}	Photon energy
ρ_{tar}	Target reflectivity
τ_{rx}	Receive optical transmission
σ_{rx}	Atmospheric attenuation coefficient
R	Range

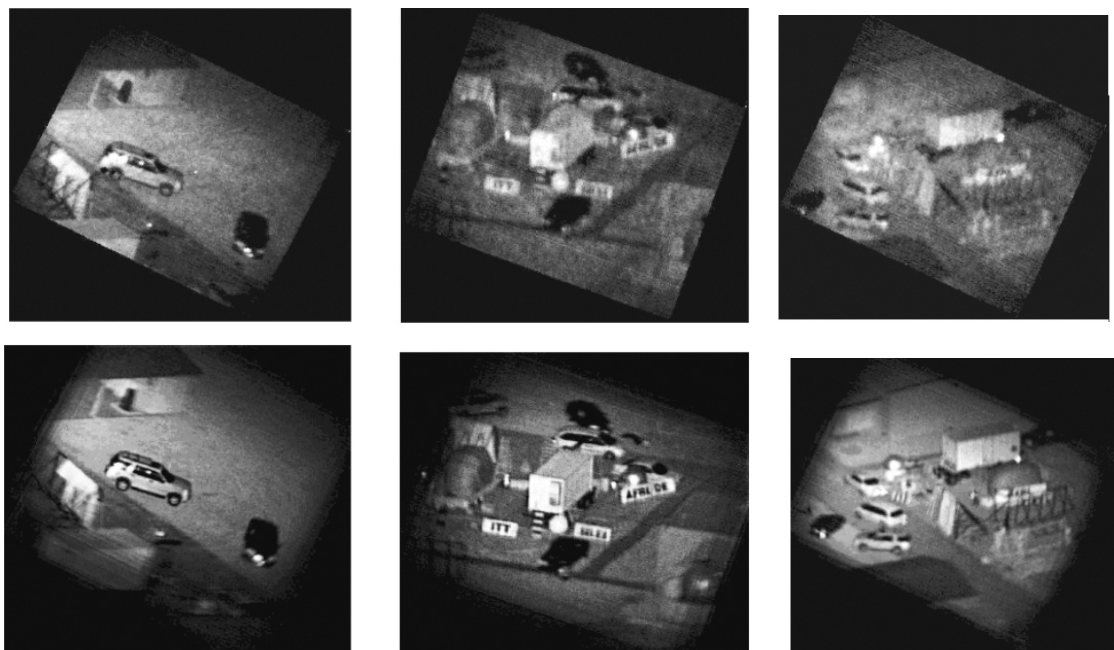


图 13 第一排：未经处理的单脉冲图像；第二排：处理过的图像

实测数据与理论值的差异可能是由于若干因素的影响，如非最佳聚焦或大气影响。

此次飞行试验证明了 BIL 系统在空中应用的重要一面。结果表明，为地面使用开发的算法同样适用于空中。进一步机载应用所需增加的算法和系统控制要求的其他事项也在该环境中得到了证明。图 13 为飞行试验中一些未处理和已处理的数据。

4 系统进一步改进

最初的工作是使 BIL 系统在动态环境中运行，目的是支持最近的系统机载试验。试验要求，系统控制及运行应进一步自动化，以尽量减少用户的工作量和克服一些机载使用中的问题。由动态平台集成的地基试验装备已经有重大进展，使用主动成像通道实现了对移动目标全方位角度的跟踪。该系统新集成的功能将在不久的将来进行的外场试验中得到验证。飞行试验后，对系统进行了一系列其他改进。最初的激光器是一个具有固定脉冲重复频率、脉冲能量和脉冲持续时间的闪光灯泵浦系统，目前已被取代。取代它的激光器是基于目前标准的 SE-



图 14 升级BIL装配系统得到的图像

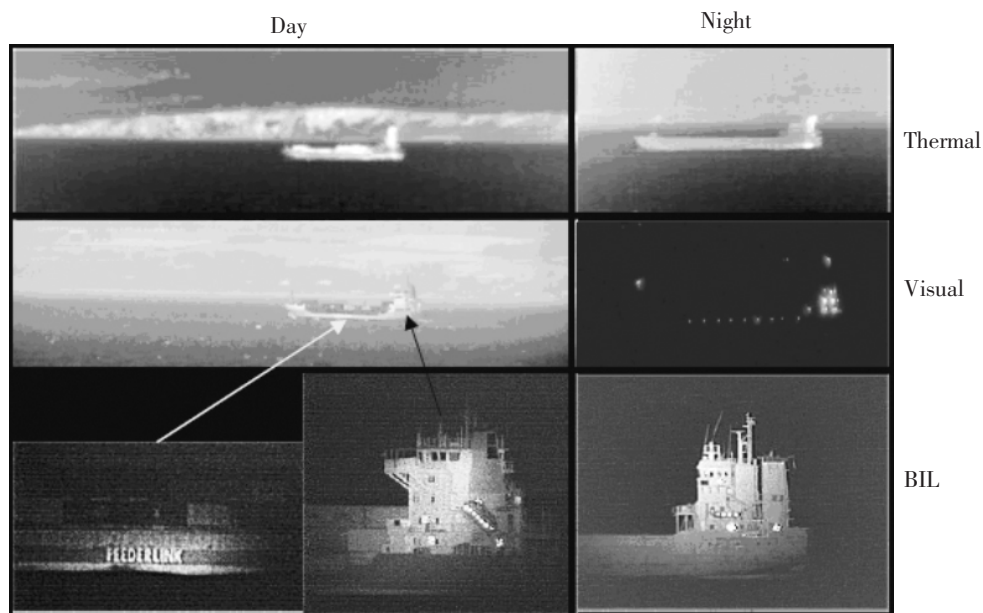


图 15 BIL装置获得的3个频带的图像

LEX S&AS 二极管泵浦固态装置。该激光器具有改变脉冲重复频率、脉冲能量和脉冲持续时间的能力,因而能够测试这些参数变化对整个系统的影响。该系统的处理和控制能力做了进一步增强,以提供更简单的交互界面和更程度的自动化。改进后的系统曾经做过现场试验。获得的图像实例如图 14 和图 15 所示。

图 15 显示的图像在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段、可视波段和主动成像的短波波段获得,并分别在白天和黑夜条件下获得。可以看出,TI 和 TV 图像有显著的不同,而 BIL 图像在白天和黑夜都具有良好的分辨率。

5 新传感器性能和功能

基于现场试验的经验和教训,正在开发新探测器,以提供比 BIL 传感器系统更加优良的功能,开发的动力主要来自于客户希望拓展 BIL 系统的性能。主要的改进涉及到缩短从一串激光脉冲到单一脉冲采集三维信息的时间,从而实现单一跟踪传感器进行全方位角度的跟踪能力。其他改进还包括拓展 SWIFT 探测器的宽带能力,以开发多个成像系统。

Baker 等人对这些设备中的细节进行了描述。

6 结 论

本文阐述了选择一个远距离高分辨率成像的 BIL 系统的基本原理,并列举了一个实例说明大气湍流的影响,还对进行校正的算法的结果做了介绍。此外,还介绍了二维焦平面功能的扩展情况,对其提取三维数据的能力进行了证明。

地面试验中执行的相关控制程序说明系统有很高的自动化程度,该系统的成熟程度使之在机载试验中得到了功能拓展,并成为空中试验系统的重要组成部分。为地面使用开发的算法在空中也运行很好,但飞行试验获得的闪烁水平则高于预期的数值。飞行试验数据被用来证明系统模型辐射的准确性,并在模型输出上给人们提供了极大的信心。

BIL 系统与试验飞机的集成突出了 BIL 系统与平台的导航和姿态测量系统的同步性。使用一个简单的全球定位系统与之集成对实验已足够,然而, BIL 系统还可以通过与机载设备更紧密结合实现进一步自动化。

平台激光器与传感器系统的持续发展可能在未来几个月内产生重大的功能改进。