

分布式光电系统性能评估

李江勇*, 王淼妍, 贲畅

华北光电技术研究所, 北京 100015

摘要 分布式光电解决了传统光学系统大视场与高分辨率成像的矛盾, 在军事侦查、安全监控、天文观测等领域具有广泛的应用。分布式光电系统通过图像拼接和超分辨重建等处理手段提升图像质量, 从而提升系统探测能力和识别能力, 但目前仍缺乏系统性的性能评估方法。建立了分布式光电系统性能量化评估方法。首先对分布式光电系统理论及图像处理算法进行了基础研究, 通过分析图像空间分辨率、信噪比、信息熵等参数, 对重构后图像质量进行评价, 最后从光电系统和图像质量两个角度出发, 对分布式光电系统的探测能力、识别能力进行了理论分析。该研究为分布式光电技术的发展提供了重要理论支撑。

关键词 成像系统; 光电探测; 分布式系统; 超分辨; 探测能力; 识别能力

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1811026

Evaluation of Distributed Optoelectronic System Properties

Li Jiangyong*, Wang Miaoyan, Ben Chang

North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China

Abstract Distributed optoelectronics solves the contradiction between large field of view and high resolution, which is widely used in military reconnaissance, security monitoring, astronomical observation, and other fields. The distributed optoelectronic system improves the image quality through imaging stitching and super-resolution reconstruction, thereby enhancing the detection and recognition capability. However, there is still a lack of systematic evaluation method for distributed optoelectronic systems. This article establishes a quantitative evaluation method for distributed optoelectronic systems. Firstly, we study the theory of distributed optoelectronic systems and the image processing algorithms. Then the image quality is evaluated by analyzing the spatial resolution, signal-to-noise ratio, information entropy, and other parameters. Finally, the theoretical analysis of the detection and recognition capability is carried out from perspectives of optoelectronic systems and image quality. This paper provides important theoretical support for the development of distributed optoelectronic technology.

Key words imaging systems; optoelectronic detection; distributed systems; super-resolution; detection capability; recognition capability

OCIS codes 110.2970; 110.2990; 110.3000

1 引言

在复杂的军用光电系统中, 很难通过单一通道感知描述外界环境。分布式是光电侦察设备的一个关键技术, 在未来相当长一段时间内, 分布式光电系统在执行战场“发现”任务中将扮演重要角色。分布

式光电系统通过多孔径或多平台光电探测, 增强信息感知能力, 提高作战应用效率, 如 F-35 光电分布式孔径系统(EODAS)、舰载分布式孔径红外系统、无人机分布式协同光电侦察系统等^[1]。

分布式光电系统相比单孔径光电系统, 具有小平台、高性能、生存能力强等优势, 未来将成为军用

收稿日期: 2021-06-26; 修回日期: 2021-08-06; 录用日期: 2021-08-09

通信作者: *ljybj11@163.com

光电装备的主要发展方向之一。单孔径光电系统通常采用增大口径或提高探测器灵敏度方式提高探测能力,因受加工工艺和制造成本的限制,具有一定的局限性。另外,单孔径光电系统难以同时满足大视场和高分辨率的要求,在探测器像元尺寸和像素数目不变的条件下,要获得大视场,就要减小光学系统的焦距,使分辨率降低;要提升空间分辨率,只能使用视场较小的光学系统。分布式光电系统通过多个传感器协同工作获取目标不同视角、不同距离下的图像,通过图像处理得到像质更好、分辨率更高的图像,有效解决了单一传感器高分辨率和大视场的技术瓶颈。

随着分布式光电技术的迅猛发展,如何定量评估分布式光电系统性能是目前存在的一个问题,对分布式的形式、数量、目标分配等具有至关重要的作用。本文针对机载分布式光电设备,从光电系统和图像质量两个角度出发,建立分布式光电系统探测能力和识别能力的理论模型和定量评估方法,这对分布式光电协同探测技术的发展具有指导意义。

2 分布式光电系统

分布式光电系统的每个传感器可对目标进行独立成像以获取目标同时刻不同视角的图像,然后对单传感器图像进行预处理,对预处理后的图像进行配准,最后对图像进行超分辨重建,以获取大视场高分辨率的成像效果。分布式光电系统具有体积小、大视场、高分辨率的特点。

分布式光电系统图像处理环节包括图像预处理、图像匹配、超分辨图像重构三个步骤。

1) 图像预处理

单传感器获取的原图像由于光线、气候等影响,含有多种噪声,首先对图像进行预处理,以抑制背景噪声,提高图像信噪比和对比度。图像预处理有时域滤波和空域滤波两种。时域滤波将图像序列在时间域的均值作为当前帧图像的噪声估计,再求出每个空间坐标在时间维的灰度标准差,将原图像与均值图像进行差分,得到滤波结果。空域滤波是对图像每个像素的取值进行线性或非线形处理,使得图像对比度或灰度得到均衡或增强。常见的空域滤波法有邻域滤波、中值滤波、高斯滤波等。

2) 图像匹配

图像匹配是将多幅在不同平台下采集的、有一定重叠视场的图像进行互相配准,把多帧低分辨率图像映射到同一坐标系下^[2]。图像配准的精度会影

响后续图像的重构效果,是分布式光电系统重构高分辨率图像的重要环节。图像配准的方法有仿射变换法^[3]、基于光流的图像配准法^[4]、基于多项式展开的图像配准法^[5]、基于分层迭代全局运动估计的配准法^[6]、尺度不变特征变换匹配(SIFT)算法^[7]。其中,SIFT算法主要包括4个步骤:尺寸空间极值检测,图像特征分析与提取,生成特征矢量,以及特征匹配与相对位移。SIFT算法稳定性高,在光源变换、尺度变化并旋转的情况下适应性好,并且计算速度快,在遥感、计算机视觉、目标识别等方面应用广泛。

3) 超分辨图像重构

超分辨重建是利用多张具有互补信息的子图像重建出高分辨图像^[8]。超分辨图像重构的原理是建立数学理论模型对退化图像进行复原,主要有频域法和空域法两种。频域法是在频域上还原由于频谱混叠所淹没掉的离散频谱,此方法需满足帧间亚像素位移和帧数不小于4帧的条件^[9]。空域法通过变换像素点提高图像空间分辨率,处理时兼顾运动模糊、滤波重采样与差值,更接近图像实际的退化模型,主要有非均匀插值法^[10]、凸集投影法(POCS)^[11]、迭代反向投影法^[12]、基于概率统计的超分辨重建法^[13],以及混合超分辨重建方法。近年来,基于学习字典的超分辨重建技术成为研究热点,通过对多帧图像进行学习获取先验知识,建立高分辨率图像到低分辨率图像的映射模型,实现超分辨重建^[14]。

图1所示为三架分布式无人机平台中波红外传感器捕获的对地图像及超分辨重建结果。其中传感器谱段为 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$,像元尺寸为 $15\ \mu\text{m}$,像元规模为 640×512 ,光电载荷焦距为 $360\ \text{mm}$ 。图1(b)为图像配准的结果,图像配准采用SIFT算法,SIFT算法适用于目标被部分遮挡、光源变化、目标旋转、缩放和平移等场景。超分辨重建采用基于学习的超分辨重建方法,以无人机采集的大量红外图像作为训练样本,建立拉普拉斯金字塔模型作为图像特征空间,对图像高频信息进行估计。

3 图像质量评估

分布式光电系统性能提升体现在获取图像质量提升,因此,分布式光电系统性能评估首先要对超分辨重建后的图像质量进行评价。图像质量评价一般分为主观评价和客观评价两种。主观评价是指人眼对图像优劣的主观定性评价,建立在统计意义上。

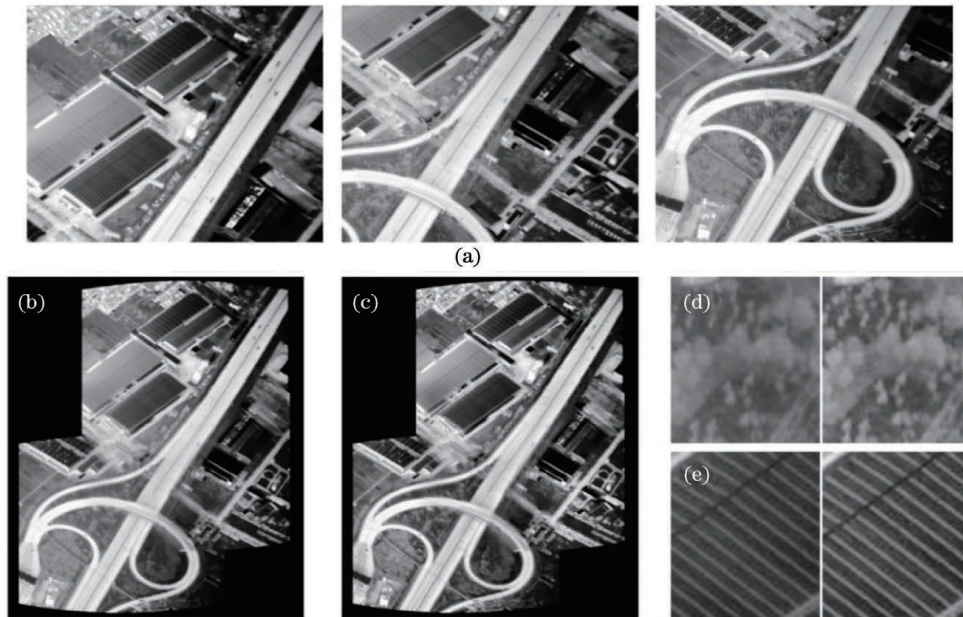


图 1 分布式光电系统的图像超分辨重建结果。(a)不同无人机平台拍摄的地面中波红外图像;(b)SIFT 配准后拼接的大视场图像;(c)基于学习的超分辨重建结果;(d)(e)放大后的超分辨结果

Fig. 1 Super-resolution reconstruction images of distributed optoelectronic system. (a) Mid-wave infrared images of ground captured from different UAV platforms; (b) large field of view image obtained by SIFT registration; (c) super-resolution image reconstructed based on learning; (d)(e) super-resolution results after amplification

客观评价指标设计计算模型对图像质量进行量化,传统的评估指标有统计特性、梯度值、信息熵、频谱特性等^[15]。分布式光电系统探测能力与图像信噪比相关,识别能力与图像空间分辨率、信息熵、梯度值有关,因此,建立空间分辨率、信噪比、信息熵、梯度值计算模型对超分辨重构后图像质量进行评估。

3.1 空间分辨率

空间分辨率指光电系统可以识别物体的临界几何尺寸,反映到图像上为可识别的最小细节的度量。空间分辨率受光学系统和探测器双重限制,即受艾里斑尺寸和像元尺寸双重限制。依据瑞利判据准则,当一个点的艾里斑中心刚好与另一个点的艾里斑边缘零点重叠时,这两个点可以被分辨,两点中心距离就是光学衍射分辨率,其表达式为

$$\delta_{\text{opt}} = \frac{1.22\lambda}{D} R, \quad (1)$$

式中: λ 为波长; R 为物距; D 为通光孔径。由于光学系统 F 数可表示为 $F = f/D$, f 为光学系统焦距,则(1)式可改写为

$$\delta_{\text{opt}} = 1.22\lambda F \cdot \frac{R}{f}. \quad (2)$$

根据奈奎斯特(Nyquist)采样定律,探测器可分辨的两个等亮度点的最小距离为两倍像元间距 $2d$,因此探测器 Nyquist 分辨率为

$$\delta_{\text{det}} = 2d \cdot \frac{R}{f}. \quad (3)$$

对于一个完整的光学成像系统,其分辨率由艾里斑直径和探测器像元间距共同决定,受限于其中最小可分辨距离较大者,当 $F\lambda/d \leq 1$ 时,成像系统分辨率受限于探测器分辨率;当 $F\lambda/d \geq 1$ 时,成像系统分辨率受限于光学衍射极限^[16]。实际应用中,随着探测器技术的发展,像元尺寸越来越小,成像系统分辨率越来越多地受光学衍射极限的限制,尤其是长波红外成像系统。

光学成像系统分辨率反映到图像上,可以用调制传递函数(MTF)来定性和定量描述,这与光学成像系统的衍射效应、像差和探测器性能等有关。MTF 是光学传递函数(OTF)的模值,OTF 是成像系统点扩展函数(PSF)的傅里叶变换,成像系统 PSF 是光学衍射 PSF 与探测器 PSF 卷积后的结果。

根据傅里叶变换理论,MTF 表示能够通过光学系统的各种频率所占比重的函数,MTF 越宽表示图像中高频信息越多,系统分辨率更高。图 2(a)所示为图 1(a)中单平台原始图像 MTF 分布,图 2(b)所示为超分辨重构后对应图像 MTF 分布。MTF 中心表示图像中的低频成分,即图像的平滑部分,MTF 边缘表示图像中的高频成分,即图像中细节部分。

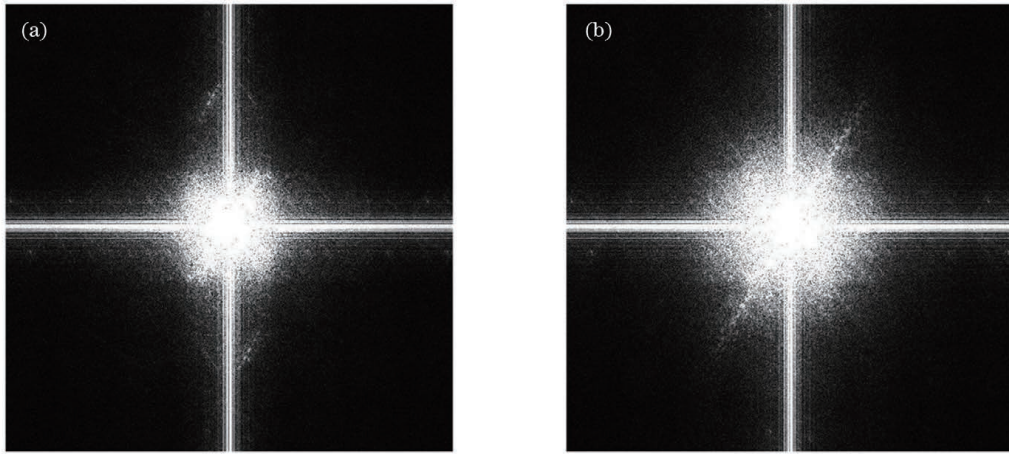


图 2 MTF 分布图。(a)原始图 MTF 分布图;(b)超分辨重构后 MTF 分布图

Fig. 2 MTF distribution images. (a) MTF distribution image of original figure; (b) MTF distribution image after super-resolution reconstruction

从上面的频谱分布图可以看出,超分辨重建后图像相比原始图像的频谱更宽,高频信息成分更多,包含的图像细节信息更加丰富,图像质量更好。图像分辨率反映了光电系统的识别能力,因此分布式光电系统相比单平台光电系统识别能力得到提升,可通过 MTF 函数对其进行定量分析。

3.2 信噪比

图像信噪比(SNR,可用 R_{SNR} 表示)指信号灰度值的均值与背景灰度值偏差的比值。在图像增强、超分辨重建、去背景噪声等处理过程中,信噪比常用作判断图像质量的一个标准。图像信噪比计算式为

$$R_{SNR} = 10 \lg \left\{ \frac{\frac{1}{N_{sig}} \sum f_{sig}(i, j)^2}{\frac{1}{N_{noi} - 1} \sum [f_{noi}(i, j) - \bar{f}_{noi}]^2} \right\}, \quad (4)$$

式中: $f_{sig}(i, j)$ 为信号在像素点 (i, j) 处的灰度值; $f_{noi}(i, j)$ 为噪声在像素点 (i, j) 处的灰度值; N_{sig} 为信号所占像素的个数; N_{noi} 为噪声所占像素的个数。信噪比数值越大,图像质量越好。

3.3 信息熵

图像熵表示为图像灰度级集合的比特平均数,单位是 bit/pixel,是用来描述图形信息丰富程度的,可以量化评价图像清晰度和图像质量。图像信息熵计算公式为

$$H(x) = - \sum_{i=0}^{L-1} P_i \log_2 P_i, \quad (5)$$

式中: L 表示灰度级总的级数,对于 8 位灰度图, L 值取 256; P_i 表示图像中灰度值为 i 的像素所占的

比例。图像信息熵值越大,重建后图像包含的信息就越多,包含更多的图像细节,图像的整体质量也会提高。

3.4 梯度值

平均梯度值指图像的边界或影线两侧附近灰度值差异变化率,反映了图像微小细节反差变化的速率,即图像多维方向上密度变化的速率,表征图像的相对清晰程度。其表达式为

$$\bar{g} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{\frac{(\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2)}{2}}, \quad (6)$$

式中: M 表示图像列数; N 表示图像行数; ΔI_x 为图像在 (i, j) 处 X 方向的梯度, ΔI_y 为图像在 (i, j) 处 Y 方向的梯度值,可分别表示为

$$\begin{cases} \Delta I_x = f(i+1, j) - f(i, j) \\ \Delta I_y = f(i, j+1) - f(i, j) \end{cases} \quad (7)$$

从(7)式可以看出,图像的梯度相当于 2 个相邻像素之间的差值。梯度值越大,图像对比度越明显,尤其是图像中物体的轮廓和边缘与背景区别更加明显,因此,可以用梯度值评估图像的清晰程度。

表 1 所示为图 1(a)中单平台红外图像与重构后超分辨图像的质量对比,分别计算两幅图像的信

表 1 原图与超分辨重构图的图像质量对比

Table 1 Quality comparison between original image and reconstructed super-resolution image

Parameter	SNR /dB	Information entropy	Gradient value
Original image	22.8	5.32	1.035
Reconstructed image	25.1	6.27	1.123

噪比、信息熵和梯度值参数。经计算可得图像信噪比提升 1.7 倍,在同等探测信噪比阈值下,分布式光电系统相比单平台具有更强的探测能力。通过对比图像信息熵,可得重建后图像信息熵值大于原图像,这表明超分辨重构后图像包含的细节信息更多,质量更高,在同等观察距离下,分布式光电系统的识别能力更强。

通过对比平均梯度值,发现分布式超分辨重构后图像梯度值大于单平台红外图像梯度值,这表明重构后图像含有更多细节信息,图像更清晰,分布式光电系统识别能力更强。

4 系统能力评估

分布式光电系统利用多传感器采集图像,通过图像拼接和超分辨重建等手段提升图像质量,从而提升系统探测能力和识别能力。探测能力和识别能力作为光电系统的核心指标,对分布式方式、目标分配等具有至关重要的作用,是分布式光电协同探测技术发展的理论基础。从影响分布式光电系统性能的两个方面,即分布式多传感器系统本身和融合处理后的图像质量,建立了分布式光电系统探测能力和识别能力的理论模型和量化评估方法。

4.1 系统探测能力评估

光电系统探测能力指在一定大气条件下,系统对某一实际目标可发现的最远距离。红外系统实现远距离“点”目标探测,还需满足一定的信噪比阈值。分布式光电系统获取多传感器图像,经过融合重构后,图像信噪比提升,作用距离更远。

从红外焦平面探测器的信噪比模型出发,首先建立单传感器作用距离模型,然后对分布式多传感器成像系统的探测能力进行理论分析。

红外焦平面探测器信噪比 R_{SNR} 等于探测器输出信号电压 V_s 除以探测器噪声电压 V_n 。输出信号电压 V_s 由探测器接收到的辐射通量 Φ 乘以探测器的光谱响应率 R_λ 得到:

$$V_s = \Phi \cdot R_\lambda \quad (8)$$

点源目标到达探测器的辐射通量为

$$\Phi = E_\lambda \cdot A_0 \quad (9)$$

式中: E_λ 为红外探测系统接收到的点源目标光谱辐照度,可表示为

$$E_\lambda = \frac{I_\lambda \cdot \tau_{a,\lambda}}{R^2} \quad (10)$$

式中: I_λ 为点源目标辐射强度,单位为 W/sr ; $\tau_{a,\lambda}$ 为大气透过率; R 为探测器与点源目标的距离。 A_0 为

光学系统的接收面积,可表示为

$$A_0 = \frac{1}{4} \pi D_0^2 \quad (11)$$

式中: D_0 为光学系统的有效口径。将(10)、(11)式代入(9)式得到探测器单个像元接收到的辐射通量的表达式为

$$\Phi = \frac{\pi D_0^2 I_\lambda \cdot \tau_{a,\lambda}}{4R^2} \quad (12)$$

对于某一波长范围 (λ_1, λ_2) 、大气平均透过率 τ_a 、探测器平均光谱响应率 R_0 ,有

$$R_0 = \frac{V_n D^*}{\sqrt{A_d \Delta f}} \quad (13)$$

式中: D^* 为探测器响应率; A_d 为探测器像元感光面积; Δf 为探测器噪声等效带宽。将(12)、(13)式代入(8)式,并考虑光学系统透过率 τ_0 、信号过程因子 δ ,则探测器的输出电压信号表达式为

$$V_s = \frac{\pi D_0^2 D^* I_\lambda \delta \tau_0 \tau_a}{4R^2 (A_d \Delta f)^{1/2}} V_n \quad (14)$$

信噪比 R_{SNR} 表示为

$$R_{SNR} = \frac{V_s}{V_n} = \frac{\pi D_0^2 D^* I_\lambda \delta \tau_0 \tau_a}{4(A_d \Delta f)^{1/2}} \cdot \frac{1}{R^2} \quad (15)$$

红外探测系统的作用距离为

$$R^2 = I_\lambda \cdot \tau_a \cdot \frac{\pi \delta \tau_0 D_0^2 D^*}{4(A_d \Delta f)^{1/2}} \cdot \frac{1}{R_{SNR}} \quad (16)$$

分布式光电系统探测能力基于多个单传感器光电系统的探测能力,图像经过融合重建后,探测能力得到提升。分布式光电系统探测能力与两个方面有关:一是探测距离最远的传感器;二是图像经融合重构后信噪比的提升。分布式光电系统作用距离 R_{dis} 可表示为

$$R_{dis} = R_s \cdot \sqrt{\frac{R_{SNR,sf}}{R_{SNR,s}}} \quad (17)$$

式中: R_s 为其中探测能力最强的传感器的探测距离,与其光电系统参数有关; $R_{SNR,s}$ 为探测能力最强的传感器所获图像目标的信噪比; $R_{SNR,sf}$ 为分布式光电系统图像经过融合重建后的目标信噪比。探测能力最强的传感器在特定检测信噪比门限下的检测概率和虚警率,为分布式光电系统的检测概率和虚警率,信噪比门限一般取 5。

分布式光电系统相比单孔径光电系统,探测能力得到提升;重构后图像目标的信噪比,与分布式排布方式、目标位置、目标区重叠数有关。目标区重叠数越多,重构后图像目标信噪比越高,探测距离越大。图 1 中分布式光电载荷重构后超分辨

图像信噪比相比单平台提升 1.7 倍,探测距离增大 1.3 倍。根据香农定理,采样数与信噪比呈非线性关系,实际应用中,需要根据系统探测能力需求、目标数目、目标位置等对分布式光电平台进行合理分配。

4.2 系统识别能力评估

光电系统目标识别指将一个特殊目标从背景或其他类目标中区分,识别能力包含识别距离和识别准确率,与图像空间分辨率、信噪比、信息熵、梯度值均有关。多传感器图像经过融合重建后,图像分辨率和信噪比得到提升,多传感器识别距离相比单平台更远。图像信息熵和梯度值反映图像清晰度和细节信息,图像经过超分辨重建后,信息熵和梯度值增加,同等识别距离下多传感器识别准确率更高。

分布式光电系统的识别能力与两方面有关:一是识别能力最强的传感器系统;二是图像融合重构后分辨率的提升。采用空间频域法定义分辨率,分布式光电系统识别距离 r_{dis} 表示为

$$r_{dis} = r_s \cdot \frac{d_{sr}}{d_s}, \quad (18)$$

式中: r_s 为识别能力最强的传感器的识别距离,与其光学系统焦距、探测器像素尺寸等有关; d_s 为获取图像的 MTF 下降到一定阈值下的频率值; d_{sr} 为超分辨重构后图像 MTF 下降到同等阈值下的频率值。

采用 Johnson 准则计算单平台传感器识别能力,Johnson 准则将人眼对目标的感知等效为对“线对数”的视觉水平,不考虑目标具体形态和类别,以目标临界尺寸张角内等效条纹数目的分辨率确定红外系统的识别能力。目标在一定识别概率 P 下对应的条带数 N 满足

$$P = \left(\frac{N/N_{50}}{1 + N/N_{50}} \right)^E, \quad N = 2.7 + 0.7(N/N_{50}), \quad (19)$$

式中: N_{50} 为 50% 识别概率下的条带周期数; E 与目标信噪比及背景环境有关, $E \leq 1$ 。目标临界尺寸为 \sqrt{A} ,目标识别概率 P 条件下,所需条带数为 N ,目标占据 $2N$ 个瞬时视场(IFOV,其值可用 I_{FOV} 表示),目标识别距离 r_s 为

$$r_s = \frac{\sqrt{A}}{2N \cdot I_{FOV}}. \quad (20)$$

图像 MTF 可采用倾斜刀口法和 PSF 测量法得到^[17]。图 3 为仿真的单传感器点目标 MTF 曲线及超分辨重建后 MTF 曲线。

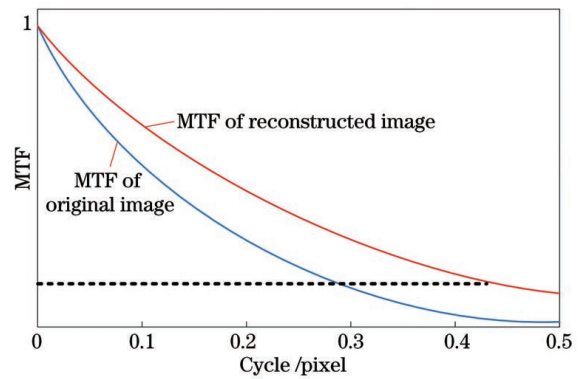


图 3 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves

通过分析原图像和超分辨重构后图像的 MTF,取 MTF 下降到 0.1 时的空间频率为极限频率,经过超分辨处理后,分辨率提升 1.5 倍,系统识别距离增大 1.5 倍。经过超分辨处理后,图像信息熵和梯度值增大,超分辨图像中包含更多细节信息,识别准确率也得到提升。

分布式光电系统的识别距离增大映射到重构后图像为空间分辨率的提升。目前由多帧低分辨率图像重构一张高分辨率图像能够实现的分辨率最大提升 1.6 倍,需要的最低帧数为 4 帧^[18]。实际应用中,可根据系统识别能力需求和目标数量合理配置分布式光电平台。

5 结 论

对分布式超分辨光电系统理论进行了研究,给出了常用图像匹配算法和超分辨重构算法;通过分析图像信噪比、空间分辨率、信息熵等参数,对重构后的超分辨图像质量进行评价;从光电系统和图像处理角度,对分布式光电系统探测能力和识别能力的理论模型进行推导,对能力增量进行量化评估。分布式光电系统具备多任务、多平台执行能力,具有体积、重量、功耗和成本方面的优势,其可靠性和生存力更高。所建立的分布式光电系统性能评估方法为分布式光电技术提供理论支撑,对分布式光电技术的发展具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Lan T, Lu N Y. Application and development of electro-optical distributed aperture system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S2): 553-556.
蓝天, 陆南燕. 光电分布式孔径系统的应用和发展研究 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S2): 553-556.

- [2] Wang L. Research on multi image registration technology based on distributed aperture system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
王蕾. 基于分布式孔径系统的多图像配准技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [3] Zeng W F, Li S S, Wang J A. Translation, rotation and scaling changes in image registration based affine transformation model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(1): 18-20, 17.
曾文锋, 李树山, 王江安. 基于仿射变换模型的图像配准中的平移、旋转和缩放[J]. *红外与激光工程*, 2001, 30(1): 18-20, 17.
- [4] Yang D, Li H, Low D A, et al. A fast inverse consistent deformable image registration method based on symmetric optical flow computation [J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2008, 53(21): 6143.
- [5] Hardie R C, Barnard K J, Bognar J G, et al. High-resolution image reconstruction from a sequence of rotated and translated frames and its application to an infrared imaging system [J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(1): 247-260.
- [6] Li R X, Zeng B, Liou M L. A new three-step search algorithm for block motion estimation [J]. *IEEE Transactions on Circuits and System for Video Technology*, 1994, 4(4): 438-442.
- [7] Ke Y, Sukthankar R. PCA-SIFT: a more distinctive representation for local image descriptors [C] // *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004. CVPR 2004, June 27-July 2, 2004, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2004.
- [8] Yang X F. Research on frequency domain and spatial domain super-resolution reconstruction of remote sensing images [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
杨学峰. 遥感图象频域和空域超分辨重建技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [9] Tsai R, Huang T. Multiframe image restoration and registration [J]. *Advances in Computer Vision and Image Processing*, 1984, 1(2): 317-339.
- [10] Cao Y Z, Liu T, Wang W, et al. Wavelet fusion based image super-resolution restoration of projection onto convex set [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6625: 662519.
- [11] Stark H, Oskoui P. High-resolution image recovery from image-plane arrays, using convex projections [J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics and Image Science*, 1989, 6(11): 1715-1726.
- [12] Irani M, Peleg S. Improving resolution by image registration [J]. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 1991, 53(3): 231-239.
- [13] Schultz R R, Stevenson R L. Improved definition video frame enhancement[C]//1995 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, May 9-12, 1995, Detroit, MI, USA. New York: IEEE Press, 1995: 2169-2172.
- [14] Baker S, Kanade T. Limits on super-resolution and how to break them[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(9): 1167-1183.
- [15] Ma K D, Wu Q B, Wang Z, et al. Group MAD competition? A new methodology to compare objective image quality models[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 27-30, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2016: 1664-1673.
- [16] Holst G C. Sampling artifacts, system design, and image processing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6712: 67120C.
- [17] Xu B S, Shi Z L, Feng B. Modulation transfer function measurement method of electro-optical imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1111004.
徐保树, 史泽林, 冯斌. 一种光电成像系统调制传递函数的测量方法 [J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1111004.
- [18] Ma D D. Research on design technology of remote sensing image restoration and super-resolution parallel processing system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
马冬冬. 遥感图象复原与超分辨并行处理系统设计技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.