

基于目标特性的欠采样等效模糊模型

杨 翠¹, 尹姝婷¹, 张延涛², 吴 鑫^{1*}

(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘要: 结合人眼视觉特性, 提出了一种基于目标特性的欠采样等效模糊模型, 将系统对欠采样的容忍度和目标的有效频谱理念引入到欠采样的量化模型中, 实现了对采样系统性能的有效评估, 从根本上解决了传统模型在预测欠采样对目标识别性能影响方面的诸多不足。

关键词: 光电成像系统; 欠采样; 混淆信号; 目标有效频谱; 等效模糊模型

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A

Target-characteristics-based equivalent blur model for under-sampled imaging systems

YANG Cui¹, YIN Shu-Ting¹, ZHANG Yan-Tao², WU Xin^{1*}

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xianyang 712099, China)

Abstract: Considering the human visual characteristics, a target-characteristics-based equivalent blur model for under-sampled imaging systems is proposed. The introduction into the model of the tolerance of the under-sampling system to the spurious response and the effective frequency spectrum makes the newly proposed model more accurate in the prediction of the target discrimination performance of an under-sampled imaging system.

Key words: electro-optical imaging systems, under-sampling, aliasing signal, the effective target spectrum, the equivalent blur model

PACS: 42.30.-d, 42.79.Pw

引言

凝视型红外焦平面阵列技术是当前红外系统发展的主流趋势,但是该技术在成像过程中存在一个严重问题,由于受限于探测器的制造工艺^[1]以及载流子的径向扩散机制^[2],探测单元处在离散位置上,获取的目标图像存在欠采样效应^[3-4]。一方面,自然景物图像为非宽带受限图像,其空间频率可认为无限大,当追求图像高保真度时,无论怎样的空间采样频率都是不够的,所以采样后的图像必然出现频谱混淆^[5],混淆产生的混淆信号对剩余的低频有效

信号产生干扰,退化目标图像^[6]。另一方面,采样图像的重建过程中,为减小混淆信号的影响,一般采用比较理想的重建滤波器,这样使得高于半采样率的高频信息丢失^[7],影响系统的成像质量。欠采样效应一直是系统性能评估研究的重点课题,尽管这方面的研究取得了一定的进展,但是到目前为止,对采样系统的目标获取性能模型还没有一个完整可靠的描述^[8]。当前应用比较广泛的光电系统性能评估 NVThermIP 模型^[9],针对欠采样存在时信号频谱混淆引起的系统性能降低的问题,主要有两种方法对其进行预测分析^[10]:欠采样等效噪声模型和等效模

收稿日期:2017-02-24,修回日期:2017-09-08

Received date: 2017-02-24, revised date: 2017-09-08

基金项目:航空科学基金项目(20122481002),高等学校学科创新引智计划(B17035)

Foundation items: Supported by the Aeronautical Science Foundation of China (20122481002), and the 111 Project (B17035)

作者简介(Biography): 杨 翠(1981-),女,河北衡水人,博士,主要从事光电传感器与成像系统等领域的研究工作。E-mail: cyang@xidian.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: xwu@xidian.edu.cn

糊模型.

等效噪声模型^[11]将整个混淆信号作为噪声处理,在一定程度上反映了欠采样效应对系统性能的影响,但是该方法存在下问题:首先噪声一定是对图像质量有害的,而混淆信号却不一定;另外通过对文献[10]中预测结果和实验数据分析可以看出,等效噪声模型对混淆的影响存在预测过度的问题,预测结果太过悲观.等效模糊模型^[12]将混淆引起的图像降质定义为系统相对模糊增量,建立了图像退化程度与欠采样效应之间的函数关系,相比于等效噪声模型,等效模糊模型定量地描述了欠采样对目标获取的影响,对于系统各个模块的匹配设计有重要的指导意义.但是该模型建模过程中仍存在诸多不足之处,对系统的预测性能与试验数据存在一定偏差.本文基于传统等效模糊模型量化欠采样效应的描述方法,同时结合已有的研究成果,从系统对混淆信号存在一定容忍度和基于目标特性的伪响应率这两方面出发,对其不足之处进行一些改进性研究,并提出了一种基于目标特性的欠采样等效模糊模型.

1 基于目标特性的欠采样模糊模型

1.1 基于目标特性的伪响应率的计算

传统等效模糊模型^[12]认为,输出图像的基带信号是固定的,而频谱混淆的程度取决于采样频率的大小,欠采样效应越明显,混淆信号越大,输出图像质量就越差,所以将混淆频谱积分与基带频谱积分的比值定义为伪响应率,并将其作为衡量混淆信号对基带信号影响的参数,其表达式为

$$SR = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (\text{spurious response}) dw}{\int_{-\infty}^{+\infty} (\text{baseband signal}) dw} \quad (1)$$

Ronald G. Driggers 等人^[12]通过改变目标图像前置模糊、采样间距、重建显示等操作方式,计算出不同欠采样程度下的伪响应率 SR.但是这一过程中实验观测的目标尺寸和观测距离均固定,忽略了不同目标空间频率下,采样对目标图像的影响不同,所以用伪响应率 SR 这单一参数来量化混淆信号的影响存在明显的局限性,针对此问题,本文做以下改进.

对于特定采样系统,将频谱混淆产生的伪信号作为一种外在的信号干扰源.图像质量评价理论认为^[13]:在噪声一定的情况下,获取的目标信噪比随着目标空间频率的增加而减少^[6],即随着目标空间频率增加,外在干扰信号对目标图像质量的退化更加剧烈.同理,系统欠采样引起频谱混淆的程度是一

定的(产生的伪响应信号一定),但是不同空间频率的目标图像信息,受伪信号的退化程度是不同的.Meitzler 等人^[14]发现,对于较低空间频率的目标,欠采样混淆信号对目标识别的影响非常小,而随着目标空间频率的升高,目标图像的退化程度加剧,系统对目标的获取性能急剧下降.即当目标尺寸较大、观测距离较近时,目标框架和细节特征比较清晰,所以获取的场景图像中包含的目标信息量较多,受伪信号影响的退化程度较小.相反对于小尺寸、远距离目标,获取的有效目标信息较少,易被伪信号所淹没.

同时人眼视觉特性表明,人眼对物体边缘点的敏感性^[15]使得在无意识的情况下,人眼有集中观测目标轮廓边缘的特性^[16-17],所以在人眼通过成像系统识别目标的过程中,人眼获取的有效目标信息与目标边缘点的数量密切相关,而从物体的频谱角度进行分析可知,目标边缘点的数量与目标临界尺寸对应频率的高低一一对应,又因为目标图像的频谱是有限的,所以人眼获取的目标有效信息对应的频谱波段为高于目标临界尺寸对应的频率点的基带频谱.借助调制传递函数 MTF 对成像质量的评估方法^[18],获取的有效目标信息为系统基带 MTF 下阴影部分的面积,如图 1 所示.

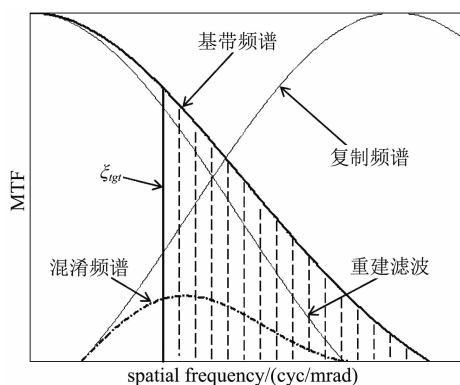


图 1 目标有效频率谱段
Fig. 1 The effective target frequency spectra

基于上述理论分析,考虑到欠采样对于不同空间频率目标图像的退化程度不同,将混淆频谱与目标有效信息对应的频谱积分的比值定义为基于目标特性的伪响应率 SR_{tgt} ,并用其来量化混淆信号对目标信号的干扰程度.其表达式为

$$SR_{tgt} = \frac{\int_{\xi_{on}}^{\xi_{out}} \sum_{n=-2,-1,1,2} H_{pre}(\xi - nv) H_{post}(\xi) d\xi}{\int_{\xi_{tgt}}^{\xi_j} H_{sys}(\xi) d\xi} \quad (2)$$

其中,目标临界尺寸对应的空间频率为 $\xi_{\text{tgt}} = 1/\frac{\text{Size}}{\text{Range}}$, ξ 为水平方向的空间频率, v 为水平方向采样频率, n 为混淆频谱级数, Range 为目标观测距离, Size 为目标临界尺寸。

区别于传统模型中 SR 的定义,新模型中认为高于目标临界尺寸对应频率 ξ_{tgt} 的基带波段为目标的有效信息频谱,所以伪响应率定义式的分母不再是整个基带的积分。该方法建立了采样效应与目标空间特征之间的对应关系,从根本上解决了传统模型性能评价的局限性。

1.2 系统对混淆的容忍度

传统等效模糊模型将欠采样引起系统分辨率的下降描述为系统模糊的增加^[12],从而定义了系统相对模糊增量 RI 。

$$\text{RI} = \frac{\text{baseline blur} + \text{additional blur}}{\text{baseline blur}} \quad (3)$$

Driggers 等人^[12]通过数据拟合得到 SR 与 RI 之间的关系,如式(4)所示,并将其应用于传统模型。

$$\text{RI} = 1/(1 - 0.58\text{SR}) \quad (4)$$

该拟合函数过于粗糙,与试验数据只在整体趋势上一致,对于较小混淆,低伪响应率的情况,拟合函数的预测结果太过悲观。Schade^[19]和 Kennedy^[20]等人认为伪响应达到一定程度才会影响系统分辨率,即认为系统性能对伪响应的影响在一定程度上是可接受的^[21],甚至在一定程度上,有混淆好于没有混淆^[22]。只有当伪信号增加到系统容忍度极限时,系统的模糊程度才会增加,性能下降。在这一理论的指导下,通过分析伪响应对系统分辨率影响的特点,并结合试验数据^[12],同时在计算基于目标特性的伪响应率基础上,建立了新的量化函数来描述伪响应对系统模糊的贡献量,其数学表达式如下

$$\text{RI} = \frac{1}{(1 - e^{-1.1/\text{SR}_{\text{tgt}}})} \quad (5)$$

两种函数的拟合曲线如图 2 所示,其中 G-data 和 F-data 分别采用高斯型和矩形重建滤波得到的数据,虚线为传统模型使用的拟合函数曲线,实线为新模型确立的全新函数关系曲线。从图 2 可以看出,在伪响应率较小时,混淆引起的伪响应处于系统对欠采样的容忍度范围内,引起的系统相对模糊增量比较小,当 SR 增加到系统的容忍度极限时,欠采样效应引起的模糊迅速增加,系统分辨率下降,新函数的拟合结果与实验数据的相关性明显提高。进一步计算均方根误差,传统函数和新函数分别为 1.306 和

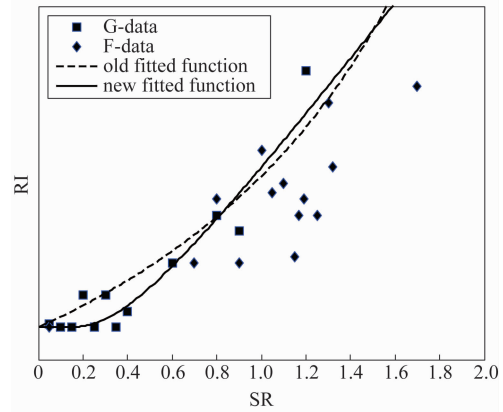


图 2 相对模糊增量和伪响应率的拟合关系
Fig. 2 The relationship between relative blur increase and spurious response

0.216,充分体现了新函数的有效性。由此可见,新模型建立的量化函数不仅遵从了 Schade 等人的理论建议,而且与试验数据具有很高的契合度,更加合理、科学地反映了欠采样对系统分辨力的影响。

1.3 结合 TTP 准则建立修正模型

TTP 准则^[9]中将人眼通过系统获取的目标图像质量定义为

$$\text{TTP} = \int_{\xi_{\text{on}}}^{\xi_{\text{off}}} \sqrt{\frac{c_{\text{tgt}}}{\text{CTF}_{\text{sys}}(\xi)}} d\xi \quad (6)$$

其中 c_{tgt} 为目标表观对比度, CTF_{sys} 为系统对比度阈值函数,其表达式为

$$\text{CTF}_{\text{sys}}(\xi) = \frac{\text{CTF}_{\text{eye}}(\xi/M)}{\text{MTF}_{\text{sys}}(\xi)} \left(1 + \frac{\sigma_{\text{disp}}^2}{\sigma_{\text{eye}}^2}\right) \quad (7)$$

其中 CTF_{eye} 是人眼对比度阈值函数, MTF_{sys} 是系统调制传递函数, σ_{eye} 是人眼内部视觉噪声, σ_{disp} 是人眼通过显示器感受到的系统噪声, M 是系统放大率。

人眼通过成像系统获取的目标等效周期数为

$$V_{\text{resolved}} = \frac{L_{\text{tgt}}}{\text{Range}} \text{TTP} \quad (8)$$

其中 L_{tgt} 为目标临界尺寸。

欠采样效应降低了系统的分辨率,使得获取的目标图像模糊程度增加,即目标的识别周期数减少,识别概率下降,所以用相对模糊增量作为修正因子,得到经过欠采样效应矫正的目标识别周期数

$$V = V_{\text{resolved}}/\text{RI} = V_{\text{resolved}}(1 - e^{-1.1/\text{SR}_{\text{tgt}}}) \quad (9)$$

利用目标传递概率函数 TTPF 进一步计算目标的识别概率

$$P_{\text{id}} = \frac{(V/V_{50})^E}{1 + (V/V_{50})^E} \quad (10)$$

$$E = 1.33 + 0.23(V/V_{50}) \quad , \quad (11)$$

式中 V_{50} 是识别概率为 50% 的目标等效周期数。

2 结果与分析

利用上述分析与建模过程,得到基于目标特性的欠采样等效模糊模型.借助 NVESD 实验室的图像数据库及其主观试验数据^[23]验证新模型对欠采样效应预测的准确性.

NVESD 实验室的图像数据库^[23]包括 12 个同类坦克目标,近距离拍摄每个目标的 12 个侧面得到 144 幅图像,如图 3 和图 4 所示.将这 144 幅目标图像划分为 6 个单元,每个单元包含每个目标的两个不同侧面,而且随机排列.通过对这些原始图像进行模糊处理,加入噪声,降低对比度等操作仿真得到不同距离下、不同系统性能下获取的目标图像,再由经过训练的观察者对其进行目标识别,统计出不同情况下的识别概率.该数据库中实验 25 和实验 36 对欠采样效应进行了研究.

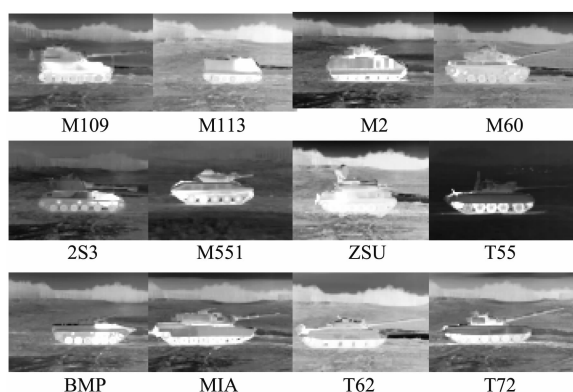


图 3 12 个同类目标

Fig. 3 Illustration of the 12 targets

2.1 实验 25

实验 25 利用 256×256 的 MWIR 凝视型焦平面阵列获取目标原始图像,探测器像元尺寸为 $28 \mu\text{m} \times 28 \mu\text{m}$,像元间隔为 $30 \mu\text{m}$,F# 为 2,FOV 为 $2^\circ \times 2^\circ$,光学焦距为 220 mm.通过仿真得到观测距离为

表 1 显示器插值的采样实验

Table 1 Display interpolations for sampling experiments

Experiment 25 & Line	First Interpolate	Second Interpolate	Third Interpolate	System magnification	Detector fill factor
Alias Line1	None	Replicate	Replicate	9	Large
Alias Line2	None	Bilinear	Replicate	9	Large
Alias Line3	None	Bicubic	Replicate	9	Large
Alias Line4	Replicate	Replicate	Replicate	18	Large
Alias Line5	Bilinear	Bilinear	Replicate	18	Large
Alias Line6	Bicubic	Bicubic	Replicate	18	Large

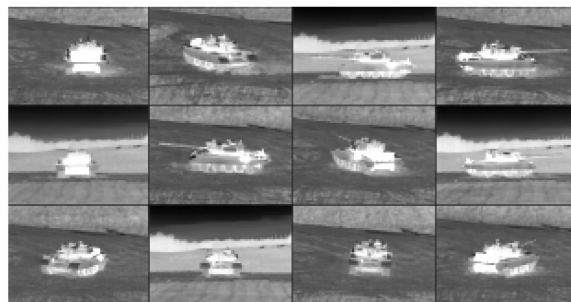


图 4 T55 坦克的 12 个不同侧面

Fig. 4 Illustration of the 12 aspects for T55 tank

0.54、1.08、1.62、2.16、2.7 和 3.24 km 处的目标图像,然后分别采用不同的插值算法(如表 1 所示)增加被显示图像的尺寸,从而改变重建图像的频谱混淆程度,之后由观测者对其进行观测,统计出不同混淆程度及不同观测距离的目标识别概率.

根据系统放大率的不同,可以将这 6 行实验结果分为两组:前三行一组,后三行一组.放大率过大大增加了混淆信号的 MTF,引起图像质量降低.1-3 行的区别在于第二次插值的算法不同,对应的图像质量依次增强.4-6 行的区别在于前两次插值的算法不同,对应的图像质量依次增强.

结合实验 25 给出的基本参数,仿真不同观测距离下,人眼通过观测成像系统识别目标的概率值,与主观试验数据进行比较,结果如图 5 所示,其中 data 是实验数据,NC 曲线是不考虑欠采样效应的模型的性能曲线,EB 是传统等效模糊模型的性能曲线,Tgt-EB 是本文提出的基于目标特性的等效模糊模型的性能曲线.

由于实验采用的显示插值算法不同,使得重建图像的频谱混淆程度不同,人眼观测的目标图像质量不同,从而导致不同的识别性能,预测结果也应存在差异.从图 5 可以看出,前 3 行和后 3 行实验的识别概率分别依次增加.对比主观试验数据,传统等效模糊模型的性能预测结果很悲观,而本文提出的新模型大大改善了在不同混淆情况下的预测精度,预

测结果非常接近于主观试验数据。

对于每行实验,随着目标观测距离的逐渐增大,获取的目标有效信息量逐渐减小,则获取的目标图像更易受混淆信号的干扰而产生退化,所以随着目标观测距离的增加,系统对目标的获取性能急剧下降。由图 5 可见,随着距离的增加,传统模型与未经矫正的模型的预测曲线之间的差别不大,而新模型与未经矫正模型的曲线之间的间隔逐渐增大,原因正是新模型充分考虑了欠采样效应对目标识别的影响与目标特性之间的关系。

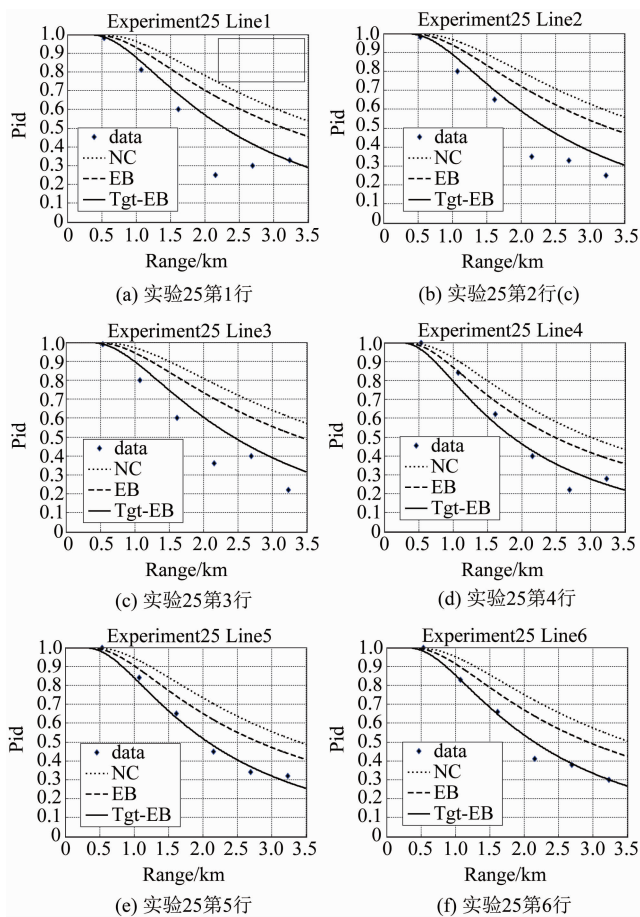


图 5 实验 25 中不同行的预测结果
Fig. 5 The predicted results for different lines of experiment 25

2.2 实验 36

实验 36 采用占空比为 100% 和 25% 的两个 256

$\times 256$ 的 LWIR 凝视型焦平面阵列获取目标的原始图像,像元间隔为 $25 \mu\text{m}$, $F\#$ 为 2, FOV 为 $2^\circ \times 2^\circ$, 光学焦距为 73.3 mm , 目标图像的仿真观测距离为 0.43 、 0.64 、 0.97 、 1.3 、 1.6 和 2.15 km . 探测器的占空比不同,显示插值方法不同,如表 2 所示,重建显示的图像存在不同的混淆效应。

对于相同规格的探测器阵列,当探测器占空比较大时,接受的场景辐射比较多,信息量大,所以受频谱混淆的影响比较小,再经过插值算法重建显示,得到比较好的图像分辨率,目标识别概率相对较大;当探测器占空比较小时则反之。实验 36 的主观数据以及各个模型的预测结果如图 6 所示。从图 6 可以明显看出,四行实验的数据存在明显差异,前两行实验相对于后两行有很好的识别性能,本文提出的新模型的预测结果与主观实验数据具有很好的一致性,实验数据点的分布与识别概率曲线非常接近,说明新模型准确地预测了不同探测器占空比下的目标识别性能,相比于传统模型具有更高的预测精度。其次对于每一行实验,随着目标观测距离的增大,获取的有效目标信息减少,混淆信号对目标图像的退化程度随之增大,即目标获取性能受欠采样效应的影响随之增大,识别概率曲线下降比较剧烈。基于目标特性的欠采样等效模糊模型中考虑了观测距离对目标获取性能的影响,所以新模型准确地描述了在不同的观测距离下,不同目标特性下,欠采样效应对系统性能的影响,成功地预测了采样成像系统的任务性能。

为了进一步分析各模型的特点,从两方面对上述预测结果进行比较:一、给出模型预测的识别概率和实验得到的识别概率之间的关系图;二、利用数学统计的方法,计算预测结果和主观试验数据之间的误差及相关性。

图 7(a)、(b) 和 (c) 分别为不考虑欠采样效应的模型、传统等效模糊模型和本文提出的新模型的预测结果与实验数据之间的关系图,以模型预测的识别概率为横坐标,以实验获取的目标识别概率为纵坐标,标出实验 25 和实验 36 在该坐标系下的对应点,图中对角线代表模型预测的目标识别概率与

表 2 探测器占空比,显示器插值的采样实验

Table 2 Detector fill-factor and display interpolations for sampling experiments

Experiment 36 & Line	First Interpolate	Second Interpolate	Third Interpolate	System magnification	Detector fill factor
Alias Line1	None	None	Bicubic	11	Large
Alias Line2	None	None	Replicate	11	Large
Alias Line3	None	None	Replicate	11	Small
Alias Line4	None	None	Bicubic	11	Small

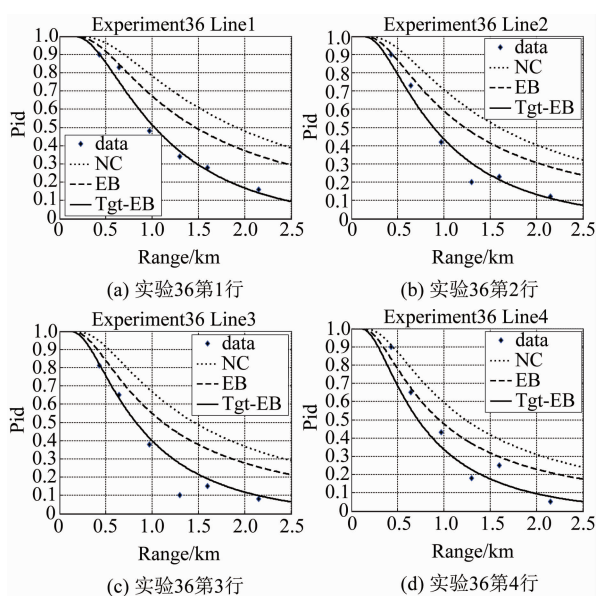


图6 实验36不同行的预测结果

Fig. 6 The predicted results for different lines of experiment 36

实验得到的概率相等的情况. 图7(a)和(b)基本上所有数据点均位于对角线的右下方,可见不考虑欠采样效应的模型和传统的等效模糊模型预测的识别概率均大于实验观测值,预测结果过于乐观. 图7(c)中的数据点整体均匀地分布在对角线的两侧,而且与对角线的偏差非常小,说明本文提出的新模型的预测结果与试验数据更加接近,相关性明显提高,预测结果更能体现真实系统的性能.

表3 模型预测精确性的比较

Table 3 Precision comparison of the three models

Experiment	NC model		EB model		Tgt-EB model	
	RMSE	COD	RMSE	COD	RMSE	COD
25	0.272	0.08	0.231	0.33	0.0815	0.8689
36	0.216	0.46	0.174	0.65	0.0732	0.8602
Mean	0.244	0.27	0.203	0.49	0.0774	0.8646

表3给出了各个模型的预测精度. 表中,标准误差 RMSE 是观测值与真值偏差的平方与观测次数比值的平方根,反映的是观测值偏离真值的离散程度, RMSE 越小,观测值与真值越接近;拟合优度 COD 是回归线对观测值的拟合程度, COD 越大越接近于 1,观测值距离回归直线越近,说明回归线对观测值的拟合度越好.

从表3可以看出,新模型的 RMSE 为 0.0774,远小于传统模型的 0.203;新模型的 COD 为 0.8646,远高于传统模型的 0.49,更加接近于理想值 1. 可见,

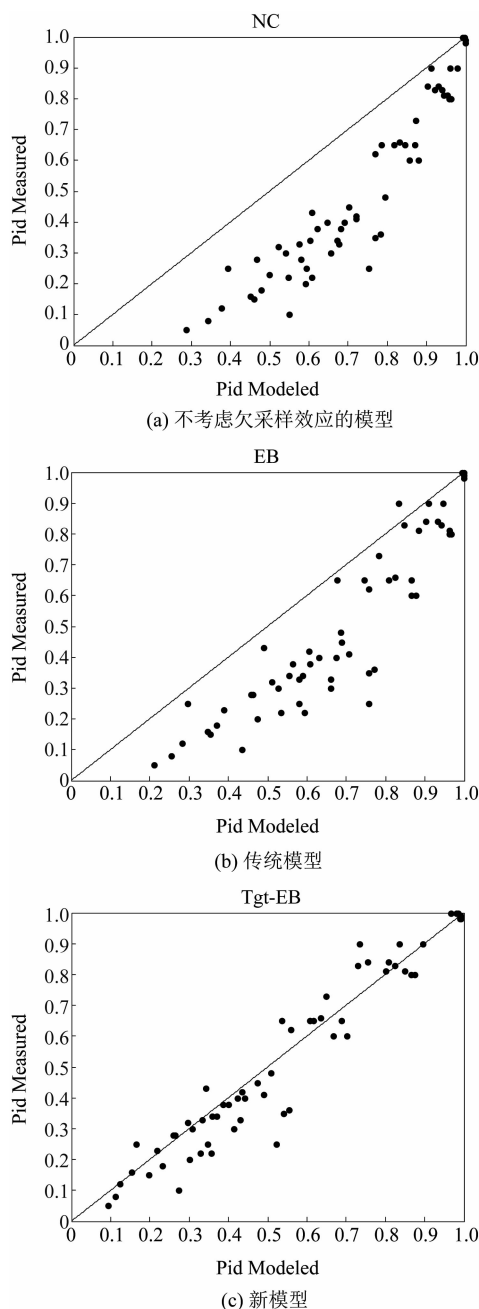


图7 三种模型的预测结果与实验得到的目标识别概率的关系图

Fig. 7 The relationship between PID measured and PID modeled results for three models

利用本文提出的新模型修正 NVThermIP 模型后,更能体现实际成像效果,其预测性能与试验数据之间的相关性更大,提高了评估结果的置信度.

3 结论

在探测器空间采样引起目标识别概率降低的研究基础上,分析了传统等效模糊模型的不足,结合已有的理论研究和试验数据,建立了基于目标特性的

欠采样等效模糊模型. 该模型将欠采样效应对目标图像的退化程度与目标的尺寸和观测距离等因素联系起来,并将系统对频谱混淆存在一定容忍度的理念引入到量化模型中,更准确地预测了欠采样效应对目标获取性能的影响. 经该模型修正的 NVThermIP 模型对成像系统固有物理效应的评估更加准确,避免了实物测试代价高、耗时长等缺点,同时性能模型中的系统结构参数易修改、优化,这为新型系统设计分析提供了可靠的依据和理论指导,具有重要的军事和经济意义.

References

- [1] Zhang X L, Meng Q D, Zhang L W, *et al.* Modeling and deformation analyzing of InSb focal plane arrays detector under thermal shock[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2014, **42**(63): 28-34.
- [2] Gravrand O, Baier N, Ferron A, *et al.* MTF issues in small-pixel-pitch planar quantum IR detectors[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, **43**(8):3025-3032.
- [3] Cui J P, Wang J H, Jin W Q, *et al.* Research on the sampling performance of the focal plane array thermal imaging systems[C]. *Proc. of SPIE*, 2011, **8193**: 819330.
- [4] Holst G C What causes sampling artifacts[C]. *Proc. of SPIE*, 2008, **6941**: 694102.
- [5] Gillette J C, Stadtmiller T M, Hardie R C. Aliasing reduction in staring infrared imaging utilizing subpixel techniques [J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**(11):3130-3137.
- [6] Sato K, Shidahara M, Goto M. Aliased noise in X-ray CT images and band limiting processing as a preventive measure [J]. *Radiological Physics and Technology*, 2015, **8**(2): 178-192.
- [7] Fanning J D, Reynolds J P. Target identification performance of superresolution versus dither[C]. *Proc. of SPIE*, 2008, **6941**: 69410N.
- [8] Bijl P, Hogervorst M A. NVThermIP vs TOD: matching the target acquisition range criteria[C]. *Proc. of SPIE*, 2007, **6543**:65430C.
- [9] Vollmerhausen R H, Jacobs E, Driggers R. New metric for predicting target acquisition performance[J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(11):2806-2818.
- [10] Preece B L, Haefner D P. Performance assessment of treating aliased signal as target-dependent noise[C]. *Proc. of SPIE*, 2011, **8014**, 80140H.
- [11] Vollmerhausen R H, Driggers R, Wilson D L. Predicting range performance of sampled imagers by treating aliased signal as target-dependent noise[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, **26**(11):2418-2418.
- [12] Driggers R G, Vollmerhausen R, O' Kane B L. Equivalent blur as a function of spurious response of a sampled imaging system: application to character recognition[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, **16**(5): 1026-1033.
- [13] McAnany J J, Alexander K R. Spatial contrast sensitivity in dynamic and static additive luminance noise[J]. *Vision Research*, 2010, **50**(19):1957-1965.
- [14] Meitzler T, Gerhardt G, Cook T, *et al.* Spatial aliasing effects in ground vehicle IR imagery[C]. *Proc. of SPIE*, 1992, **1689**:226-241.
- [15] CHANG Hong-Hua, ZHANG Jian-Qi, LI Yong. Modification of the background clutter on classical human-eye target acquisition performance model [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (常洪花,张建奇,李 勇. 背景杂波对经典人眼目标获取性能模型的修正. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(6):450-454.
- [16] Li Q, Yang C, Zhang J Q. Target acquisition performance in a cluttered environment[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(31):7668-7673.
- [17] Bex P, Solomon S G. Contrast sensitivity in natural scenes depends on edges as well as spatial frequency structure[J]. *Journal of Vision*, 2009, **9**(10):1-19.
- [18] Holst G C, Lomheim T S. *CMOS/CCD sensors and camera systems (2nd Ed.)* [M]. USA: JCD Publishing, 2011.
- [19] Schade Sr O H. *Image reproduction by a line raster process* [M]. Chapter part of Perception of Displayed Information, New York: Plenum Press, 1973:233-278.
- [20] Kennedy H V. Modeling second generation thermal imaging systems [J]. *Optical Engineering*, 1991, **30**(11): 1771-1778.
- [21] Holst G C. An engineer's approach to system performance [C]. *Proc. of SPIE*, 2007, **6543**:65430A.
- [22] Holst G C. *Electro-optical imaging system performance* [M]. Florida: JCD Publishing, 2000.
- [23] Vollmerhausen R H, Jacobs E. The targeting task performance (TTP) metric a new model for predicting target acquisition performance[R]. NVESD, 2004.