

像元映射比对半实物仿真实验影响的研究

张建忠¹ 王 健¹ 孙 强¹ 党博石¹ 李 伟²

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 天津城建大学建筑学院, 天津 300384)

摘要 为了给制导系统半实物仿真器设计过程中像元映射比选取提供准确的依据,根据探测器与仿真器空间光调制器的工作原理,研究了像元映射比对半实物仿真实验的影响。将随机靶标特有的频谱分布特性引入到仿真实验模型中,进行频谱计算,分析了不同像元映射比、不同相位变化对调制传递函数的影响,获得了映射比与调制传递函数之间的变化曲线。分析结果表明:当映射比为0.3:1和0.7:1时,相位变化对调制传递函数的影响可以忽略不计,而且系统的调制传递函数下降最小,稳定性好。分析结果为像元映射比的选择提供了定量依据。

关键词 图像处理;半实物仿真;调制传递函数;像元映射比;随机靶标

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0823003

Influence of Pixel-Mapping Ratio on Hardware-in-the-Loop Simulation

Zhang Jianzhong¹ Wang Jian¹ Sun Qiang¹ Dang Boshi¹ Li Wei²

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² School of Architecture, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract In the design process of hardware-in-the-loop scene simulator of a guidance system, in order to establish an accurate basis for the selecting of the pixel-mapping-ratio (PMR), the influence of PMR on the simulation has been analyzed based on the sampling properties of the detector of unit under test and the spatial light modulator of simulator. The unique characteristic of the spectral distribution of the random targets has been introduced into the simulation model to calculate the modulation transfer function. Furthermore, the modulation transfer function curves at different PMR and phases have been obtained. The results show that if the PMR is either 0.3:1 or 0.7:1, the influence of the phase variation on the modulation transfer function is negligible, and the modulation transfer function's value shows minimum attenuation and good stability. The quantitative criterion can be provided in the design of scene simulators.

Key words image processing; hardware-in-the-loop simulation; modulation transfer function; pixel-mapping ratio; random target

OCIS codes 230.6120; 070.2025; 070.6110; 070.6120

1 引 言

目前,电视制导技术、红外成像制导技术在军事上已有广泛应用,在反坦克导弹、空地、地空等大量的战术导弹中都能见到其身影。为了能对制导系统的动态性能进行全面测试,人们开发出不同类型的目标模拟器,包括可见光目标模拟器^[1]、红外视景仿

真器^[2]以及复合类型的目标模拟器^[3-5]。虽然上述工作取得了满意的结果,但是没有考虑数字化图像发生器与离散采样探测器的配合问题对仿真实验的影响。

Williams等^[6-7]采用传递函数分析的方法,结合采样原理给出了结论:模拟器与待测系统(UUT)

收稿日期:2014-02-19;收到修改稿日期:2014-04-21

基金项目:国家863计划(2007AA122110)、吉林省科技发展计划项目(20125092)、天津市自然科学基金(11JCYBJC03000)

作者简介:张建忠(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事可见光/红外半实物仿真器方面的研究。

E-mail: zhang_ciomp@126.com

的像元映射比应当在一维上大于 0.5:1(当 UUT 探测器的像元尺寸为 1×1 时,模拟器像元映射到探测器上的大小为 0.5×0.5 ,文中整体采用同样的假设),这样模拟器的奈奎斯特与 UUT 的截止频率一致,既保证了 UUT 在实验中不会出现频谱传递受限,也能够避免频谱混淆对仿真实验的影响。Sieglinger 等^[8]采用了相似的方法进行分析,也得到了相同的结果。在以上的分析中都是采用传递函数相乘的方法,没有分析相位对于频谱传递的影响。另外,UUT 探测器的分辨率越来越高,像元映射比(PMR)达到 0.5:1 变得难以实现,那么其他映射比下对仿真会产生什么程度的影响并没有分析,而这些却是仿真器设计中实实在在存在的问题。

本文根据探测器与仿真器空间光调制器的工作原理,建立了仿真模型,利用随机靶标特有的频谱分布特性,将其引入仿真实验频谱分析中,分析了不同 PMR 下,不同相位情况对频谱传递的影响,并定量地给出了不同映射比下的频谱传递曲线以及相位变化对频谱传递稳定性的影响,为仿真器设计中的 PMR 的选择提供了依据。

2 仿真实验的工作原理

半实物仿真实验由视景仿真器和 UUT 以及五轴转台组成,光路组成如图 1 所示。

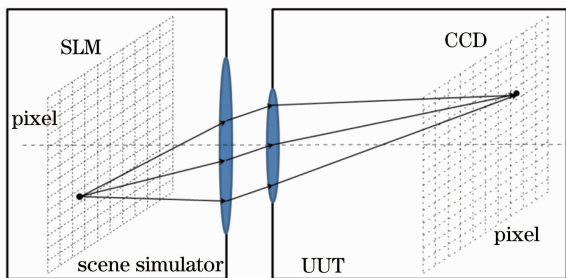


图 1 半实物仿真实验模型

Fig. 1 Hardware-in-the-loop simulation model

从图 1 中可见,视景仿真器由空间光调制器(SLM)生成明暗对比的目标-背景图像,经投影物镜投影到无穷远,UUT 与投影物镜光瞳衔接,将 SLM 成像到 CCD 靶面上,仿真实验的场景以检验待测系统发现、跟踪以及捕获目标的能力。通常的 SLM 产生的都是数字化离散图像,而接收元件 CCD 也采用离散采样的工作方式,于是就有必要讨论这两者之间的配合与哪些因素有关,并定量地讨论这些因素对仿真实验的影响。

3 数学模型

任何一幅图像都能分解为不同权重的正弦光栅图像相加的形式,这个与频率对应的权重即为功率谱密度(PSD, F_{PSD}),而传递函数表征着系统对于不同空间频率谱段的响应情况,系统工作时频谱传递满足以下关系:

$$F_{\text{PSDout}}(f) = F_{\text{MTF}}(f)F_{\text{PSDin}}(f). \quad (1)$$

因此,通过分析 PMR 与频谱传递曲线的关系,能够全面而直观地反映出映 PMR 真实实验的影响。

在传递函数评价中,传统方法是使用刀口靶标通过微分得到线扩展函数,再经傅里叶变换得到传递函数,或者通过星点像直接进行傅里叶变换得到。但是,仿真器的图像源是通过薄膜电晶体液晶显示器(TFT-LCD)或数字微镜器件(DMD)等离散像元的空间光调制器产生,并不能生成符合要求的刀口靶标或者星点靶标。Backman 等^[9-11]论述了随机靶标用于评价传递函数的方法,指出随机靶标在所有频谱上具有相同的权重,进行归一化后,随机靶标的 PSD 为 1,根据(1)式可以通过对输出图像求解 PSD 得到系统的传递函数曲线。

这里给出一个例子,验证随机靶标计算传递函数的正确性。随机靶标采用随机数产生的方法得到,如(2)式所示,图像本身就是一个空间位置与灰度值的对应关系,通过对图像任意一行做傅里叶变换,可以得到该行的 PSD,如(3)式所示:

$$P(m, n) = \text{rand}(m, n), \quad (2)$$

$$F_{\text{PSD}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |\mathcal{F}[P(i, n)]|^2, \quad (3)$$

式中 $\text{rand}(\cdot)$ 表示取值机数。随机靶标需要通过大量的随机数计算才能得到稳定的谱分布曲线,因此对 m 值要根据每一行的像素值来确定。

产生的随机靶图像如图 2(a)所示,根据(2)式得到其 PSD 曲线如图 2(b)所示。根据本文假设,探测器的尺寸为 1×1 ,那么奈奎斯特频率为 0.5,曲线只显示了奈奎斯特频率以内的频谱特性。图 2(b)中蓝线为随机靶标的计算结果,而探测器理论上的传递函数曲线如红线所示,可以通过 sinc 函数求得^[12-14],从图 2(b)中可见,两条曲线基本重合,说明随机靶标能够通过 PSD 的求解得到准确的 MTF 曲线。

采用模拟器产生随机靶标,被测系统接收,由于模拟器产生的随机靶标在整个空间频段有着恒定的频谱分布。而 PMR、相位影响都会使 PSD 在高频部分显著下降,因此合理地选择 PMR 有助于最优化

仿真系统的设计要求。在实际仿真过程中,当仿真系统与 UUT 确定时,PMR 就已经确定,而相位则是一

个随机量,这样难以通过控制变量的方法对这两个因素的变化对传递函数造成的影响做定量的分析。

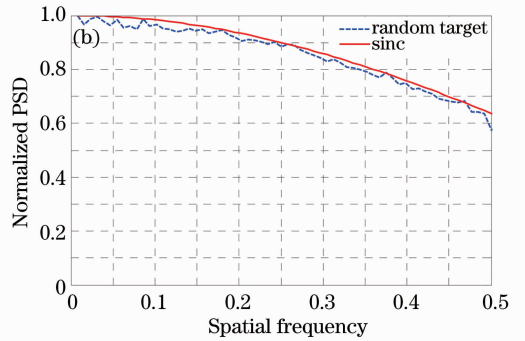
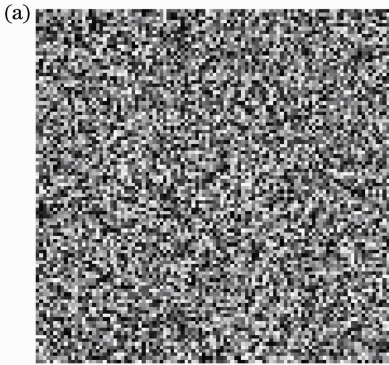


图 2 (a)随机靶标和(b)其功率谱密度

Fig.2 (a) Random target and (b) its PSD

本文利用 Matlab 建立 CCD 模型,模拟 CCD 所具有的积分与离散采样的特性。

$$h(m, n) = \sum \sum h(x, y) \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{p} - m, \frac{y}{p} - n\right). \quad (4)$$

4 仿真模型的建立

在半实物仿真中,模拟场景是通过图像芯片产生,如反射式的 DMD、硅基液晶(LCoS)或者透射式的 TFT-LCD 液晶板。模拟器产生的像素化的图像首先被成像到探测器的表面,然后通过探测器像元的积分采样,得到了待测系统的接收道德图像。假设图像芯片有 100% 的填充率,像元形状大多为正方形,在探测器像元大小为 1×1 时,单个像元被成像到 UUT 探测器上的大小为 $p \times p$,那么 PMR 即为 $p:1$ 。那么图像芯片成像到探测器表面的光强分布可以表示为

式中 $\text{rect}(\cdot)$ 表示在像元 (m, n) 像素范围内,响应值为 1,在像素范围外,响应值为 0,求和的范围是 CCD 的横向和纵向的像素数。从图像源每个像元映射的区域里有着相同的光强分布,像元之间的光亮度差异则最终体现图像的亮度对比分布。

面阵 CCD 器件对图像记录可以分解成两个过程:首先,单个像元的输出与像元内照度的面积积分成正比;其次,面阵内的像元输出值形成一幅积分采样的电子分布图。其过程如图 3 所示,上层为 CCD 像元示意图,下层则为像元对于响应积分的示意图。

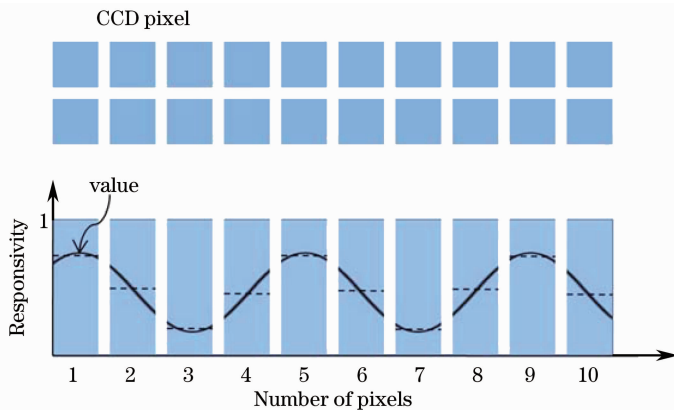


图 3 CCD 像元采样示意图

Fig.3 CCD pixel's sampling schematic

于是可以建立模型,假设每个像元具有一致的响应率,而形状为 1×1 的正方形,表示为 $\text{rect}(x, y)$ 。在像元点 (m, n) 采样输出为

$$g(m, n) = \int_{m-0.5}^{m+0.5} \int_{n-0.5}^{n+0.5} h(x, y) \cdot \text{rect}(x, y) dx dy. \quad (5)$$

这里将像元细分为 10×10 的亚像元,于是在 (m, n) 点的响应也可以通过累加的方法得到

$$g(m, n) \approx \sum_{i=-4}^5 \sum_{j=-4}^5 h(m + 0.1 \times i, n + 0.1 \times j) \times 0.01. \quad (6)$$

通过(6)式能够方便地在 Matlab 中建立 CCD 的数学模型,通过(4)式与(6)式的逐点相乘,并对每个 CCD 内的 100 个亚像元相加便可以得到在不考虑光学系统情形下,探测器对图像芯片成像的结果。相位的影响可以通过在图像芯片上光强分布 $h(m, n)$,做横向或纵向的平移得到。相位可以精确地控制到百分之一一个像元,从而可以定量地分析不同相位对于频谱传递的影响。

5 PMR 对仿真实验的影响

为了能够获得不同 PMR 下,半实物仿真实验的频谱情况,设计了仿真实验。在图 1 中,整个仿真光路由 SLM、投影物镜、UUT 光学系统以及 CCD 组成。软件模拟中,采用控制变量的方法,设定投影物镜与 UUT 光学系统为无像差系统,剔除光学系统的影响。此时,SLM 与 CCD 的相对关系成为了影响仿真的唯一因素。

这里假设 SLM 与 CCD 的像元结构均为正方形,采用 CCD 的像元尺寸做归一化,SLM 像元通过光学系统成像到 CCD 表面时的尺寸与 CCD 像元边长的比值定义为 PMR,为了考察相位关系对频谱传递的影响,必须对参考位置进行定义,如图 4 所示,定义 CCD 左上角为原点 o ,SLM 的左上角为 o' ,相位值即为 $\overline{oo'}$ 。

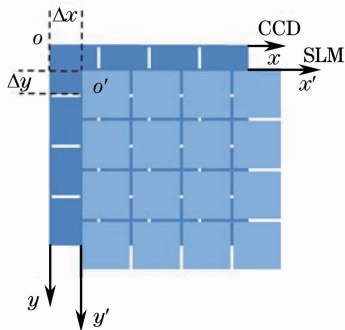


图 4 相位示意图

Fig. 4 Phase schematic

在仿真实验中,SLM 产生随机靶标图像,经过理想光学系统成像到 CCD 表面,通过 CCD 积分采样,得到另一幅随机靶标图像,通过对该图像进行频谱的变换得到 PSD,最后求得传递函数曲线。

但是,无论图像源亦或 CCD 都不具有线性移不变性质,响应不仅是频率的函数,同样也是相位的函数。当空间频率一定时,传递函数仅仅与相位值有关。

在实际的半实物仿真实验中,SLM 成像在 CCD 面上的位置与 CCD 本身像元的位置关系,即相位值是一个随机量。对于半实物仿真实验,最希望的状况是相位变化对图像对比度没有影响,不同相位下,图像具有一致的响应。才能达到半实物仿真实验重复性强,条件可控的目的。

在仿真实验中,设定 CCD 的像素数为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$,那么根据 PMR 可以得到成像到 CCD 面上的模拟器的像素数,例如在映射比为 0.5 时,在一维方向,一个模拟器像元映射到 CCD 面上的大小为 0.5×0.5 ,要覆盖整个 CCD 面阵,其分辨率要求为 $(128/0.5) \text{ pixel} \times (128/0.5) \text{ pixel} = 256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$,其他的映射比以此类推。随机靶标需要大量样本保证其计算结果的稳定,因此本文每组数据计算都是对 100 幅图像进行平均得到。

本文通过 Matlab 软件,根据(1)式生成了 SLM 上的随机靶标图像,根据(5)式和(6)式模拟了 CCD 的积分采样过程,根据(3)式得到了不同 PMR 下,不同相位时的仿真实验的传递函数曲线。

图 5 给出了 PMR 从 0.2:1~1.5:1 的传递函数曲线,横坐标的空间频率以探测器的奈奎斯特频率进行了归一化。在每一种 PMR 情况下,以 0.1 pixel 大小作为步进,得到不同相位下的传递函数曲线。从图中可见,随着 PMR 增大,奈奎斯特频率处的传递函数值在不断降低,对于高频信息的失真在逐步变大。在 PMR 分别为 0.2:1,0.5:1,1.0:1,1.5:1 时,不同相位下传递函数曲线并不重合,即在该 PMR 情况下,仿真实验的会由于相位的关系难以保证实验的可重复性。在 PMR 分别为 0.3:1,0.7:1,1.1:1 时,传递函数曲线高度重合,即在该映射比情况下,仿真实验受相位影响较小,能够保证仿真实验具有较高的重复性。

图 6 和图 7 根据图 5 的数据进一步分析,给出了奈奎斯特频率和中间频率(0.5 倍奈奎斯特频率)处 MTF 值随 PMR 变化的曲线。在 PMR 分别为 0.3:1、0.7:1 和 0.9:1 时,奈奎斯特频率处的传递函数依然大于 0.4,同时不同相位情况下 MTF 曲线一致性也很高,而在 0.2:1、0.5:1 时虽然奈奎斯特频率处 MTF 值很高,但是并不稳定,从图 8 和图 9 的 MTF 均方根(RMS)值曲线中更能直观地表现出

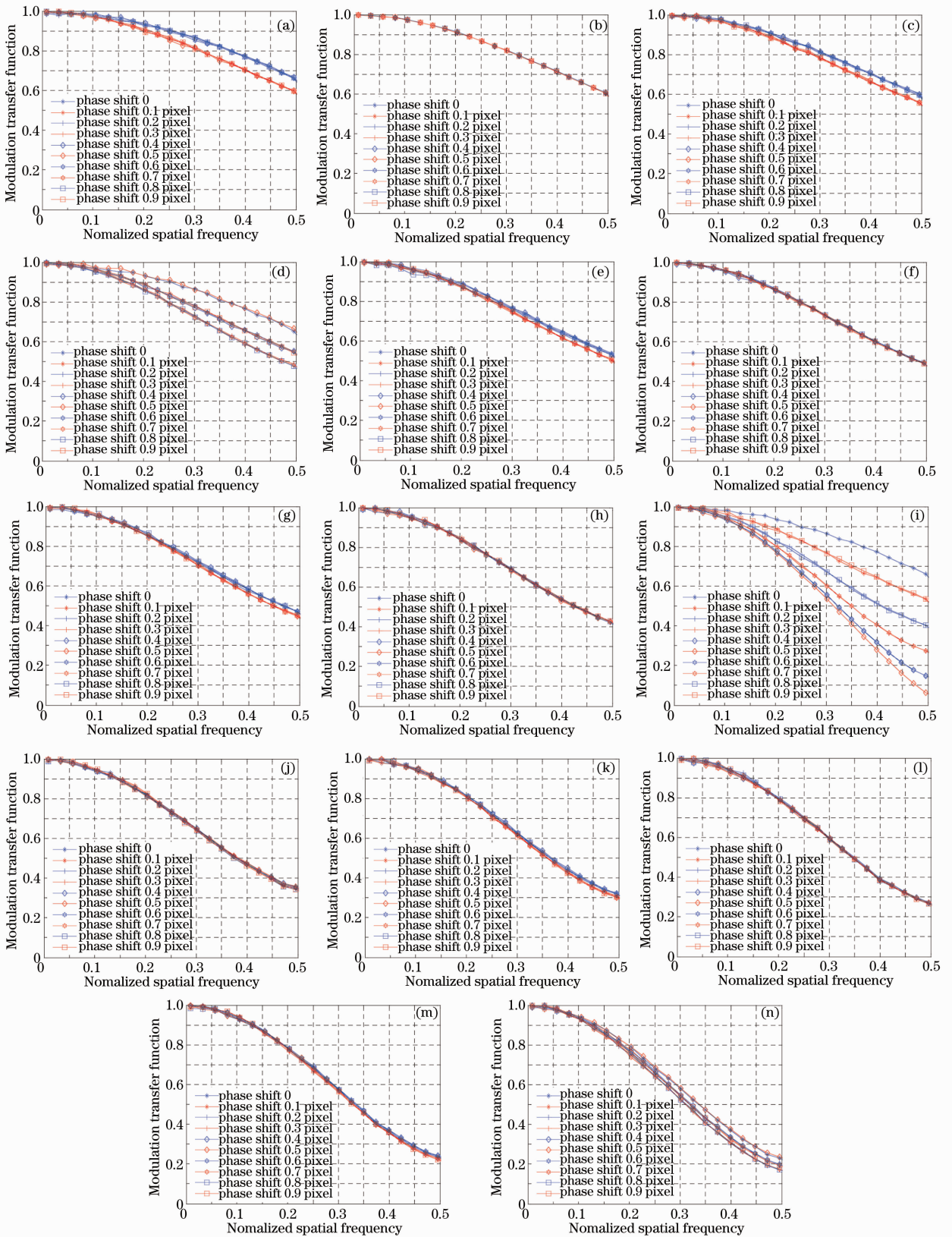


图5 不同PMR的MTF曲线。(a) 0.2:1; (b) 0.3:1; (c) 0.4:1; (d) 0.5:1; (e) 0.6:1; (f) 0.7:1; (g) 0.8:1; (h) 0.9:1; (i) 1.0:1; (j) 1.1:1; (k) 1.2:1; (l) 1.3:1; (m) 1.4:1; (n) 1.5:1

Fig. 5 MTF curves with different PMR. (a) 0.2:1; (b) 0.3:1; (c) 0.4:1; (d) 0.5:1; (e) 0.6:1; (f) 0.7:1; (g) 0.8:1; (h) 0.9:1; (i) 1.0:1; (j) 1.1:1; (k) 1.2:1; (l) 1.3:1; (m) 1.4:1; (n) 1.5:1

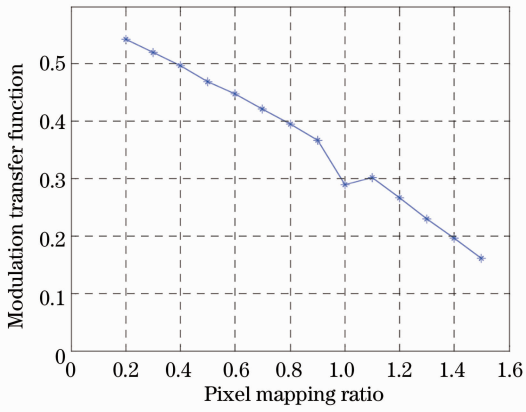


图 6 奈奎斯特频率处 MTF 变化曲线
Fig. 6 MTF at Nyquist frequency

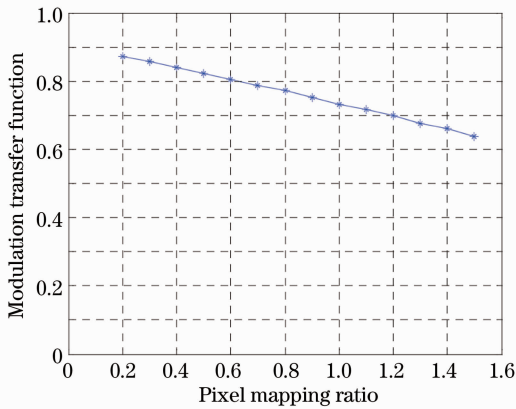


图 7 中间频率处 MTF 变化曲线
Fig. 7 MTF at intermediate frequency

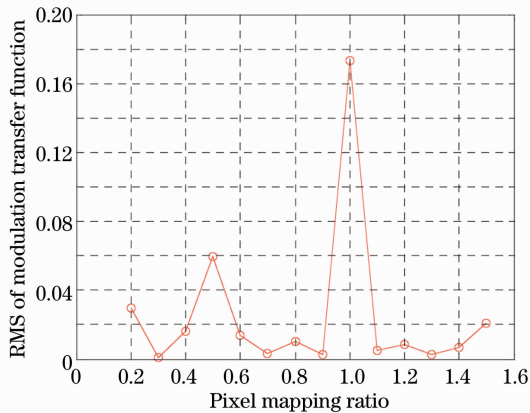


图 8 奈奎斯特频率处 MTF 的均方差
Fig. 8 RMS of MTF at Nyquist frequency

来。当 PMR 为 1:1 时,传递函数受相位影响非常严重,即同样对比度的目标由于成像位置不同,对比度的偏差会达到 0.5,因此在半实物仿真器设计过程中,应当避免像元 PMR 为 0.2:1、0.5:1 以及 1:1 的状况。

在仿真器设计过程中,当图像源的像素分辨率确定下来,模拟器的视场(FOV)与 PMR 是一对矛

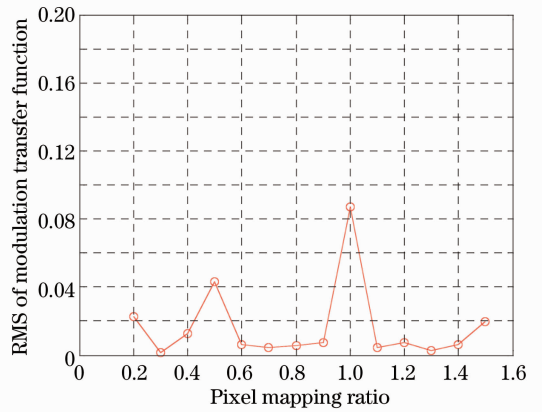


图 9 中间频率处 MTF 变化曲线
Fig. 9 RMS of MTF at intermediate frequency

盾的量,在通常的设计中会先保证模拟器视场大于待测系统视场,然而 PMR 的问题也需要纳入考虑。从上面的分析可见需要避开 PMR 为 0.2:1、0.5:1 和 1:1 的情况,在这三种情况下,相位对仿真的影响较大,难以得到稳定的仿真结果,同时当 PMR 大于 1:1 时,奈奎斯特频率处的传递函数已经低于 0.3,再考虑光学系统的影响,难以实现对该频率下目标做真实的仿真。因此,PMR 为 0.3:1 和 0.7:1 是两个较为理想的设计值。

6 结 论

本文通过探测器与仿真器 SLM 的工作原理,建立了仿真模型。利用随机靶标特有的频谱分布特性,将其引入仿真实验频谱分析中,分析了不同 PMR 下,不同相位情况对频谱传递的影响,并定量地给出了不同映射比下的频谱传递曲线以及相位变化对频谱传递稳定性的影响。通过曲线分析可见,PMR 分别为 0.5:1、0.2:1 和 1:1 时,相位变化对于频谱传递的影响非常明显,在设计中应当规避。而当 PMR 为 0.3:1 与 0.7:1 时,在奈奎斯特频率处的频谱传递依然保持较高的水平,同时受相位影响较小,是设计仿真器中比较推荐的映射比。

参 考 文 献

- Zhang Jianzhong, Sun Qiang, Yang Le, *et al.*. Design of LCD-based visible scene simulator with long exit pupil relief and large field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2453-2458.
- 张建忠, 孙 强, 杨 乐, 等. 大出瞳距大视场 LCD 型景象模拟器光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2453-2458.
- Yang Le, Sun Qiang, Wang Jian, *et al.*. A thermalization for mid-wave infrared scene projector optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(10): 1521-1525.
- 杨 乐, 孙 强, 王 健, 等. 中波红外景象投影光学系统消热

- 差设计[J]. 光子学报, 2011, 40(10): 1521—1525.
- 3 Zhang Jianzhong, Yang Le, Guo Banghui, *et al.*. Optical design of MWIR/LWIR scene projector with hamonic diffraction element [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1758—1764. 张建忠, 杨乐, 郭帮辉, 等. 基于谐衍射的红外中波/长波双波段视景仿真光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1758—1764.
 - 4 Fu Yandong. Research on Projecting Complex and Rapidly Changing Scenes with DMD Infrared Source [D]. Changchun: Changchun University of Science & Technology, 2012. 付彦东. 复杂场景快速变化 DMD 红外信源生成技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
 - 5 Dong Jianing, Mu Da, Xu Chunyun, *et al.*. Projection optical system design of infrared scene simulator based on DMD [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 49(12): 122202. 董家宁, 牟达, 徐春云, 等. 基于 DMD 的红外景象模拟投影光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 49(12): 122202.
 - 6 O M Williams. Dynamic infrared scene projection; the scene filtering and sampling problem revisited [C]. SPIE, 1998, 3368: 98—115.
 - 7 O M Williams, M A Manzardo, Burroughs Jr E. Image filtering and sampling in dynamic infrared projection systems [C]. SPIE, 1997, 3084: 233—248.
 - 8 B A Sieglinger, D S Flynn, C F Coker. Spatial and sampling analysis for a sensor viewing a pixelized projector [C]. SPIE, 1997, 3084: 220—232.
 - 9 S Backman, A Makynen, T Kolehmainen, *et al.*. Random target method for fast MTF inspection [J]. *Opt Express*, 2004, 12(12): 2610—2615.
 - 10 A Daniels, G D Boreman, A D Ducharme, *et al.*. Random transparency targets for modulation transfer function measurement in the visible and infrared regions [J]. *Opt Eng*, 1995, 34(3): 860—868.
 - 11 E Levy, D Peles, M Opher-Lipson, *et al.*. Modulation transfer function of a lens measured with a random target method [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(4): 679—683.
 - 12 Gong Faquan. Study on Optical Modulate Transfer Function of CCD and Its Measuring Method [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. 公发全. CCD 光学调制传递函数及检测方法研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
 - 13 Yuan Gaobin, Li Binqiao, Xu Jiangtao, *et al.*. Research of MTF velocity mismatch model for time delay integration CMOS area image sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0104001. 袁高斌, 李斌桥, 徐江涛, 等. 时间延迟积分型面阵 CMOS 图像传感器 MTF 速度失配模型研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0104001.
 - 14 Yu Da, Zhou Huaide, Long Kehui, *et al.*. Screening and testing method for area CCD [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0708001. 余达, 周怀得, 龙科慧, 等. 一种面阵 CCD 的筛选测试方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0708001.

栏目编辑: 何卓铭