

红外动态景象仿真中光学系统效应仿真

吴军辉,王 涛,邢 晖,张文攀,刘义和

(中国人民解放军 63880 部队,河南 洛阳 471003)

摘要:在采用数字图像注入方法对红外成像跟踪搜索系统或红外预警系统进行仿真试验中,红外动态场景仿真是仿真系统的核心技术,而光学系统效应仿真是红外动态场景仿真中的重要部分。由于仿真对象为非相干红外成像系统,光学系统效应可以只考虑其能量域内成像效应和像弥散或能量分散效应。光学系统质量一般用调制传递函数描述,可由调制传递函数计算点扩展函数,并建立基于点扩展函数的光学系统效应模型。只要调制传递函数给定准确,此方法建立的光学系统效应仿真模型的逼真度便有保证,而调制传递函数可以通过普通的光学系统测试方法获得。

关键词: 光学系统; 仿真; 红外动态景象仿真

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)01-0025-04

Optic system effect simulation in IR dynamic scenes simulation

WU Jun-hui, WANG Tao, XING Hui, ZHANG Wen-pan, LIU Yi-he

(63880 PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: In the simulation test of IR tracing and searching system or IR warning system by digital image injecting, IR dynamic scenes simulation is the core technology, and optic system effect simulation is the important part of IR dynamic scenes simulation. Since the object is incoherent IR imaging system, imaging effect and image disperse or energy disperse effect in energy domain are only considered for optic system effect. In general, optic system quality can be described by MTF. Point-expanded function can be calculated using MTF, and optic system effect model can be established based on point-expanded function. So long as MTF is accurate, the fidelity of optics system effect model established by this way can be guaranteed.

Keywords: Optic system; Simulation; IR dynamic scenes simulation

0 引言

红外动态景象仿真是红外成像装备内场仿真的

重要内容。红外成像装备仿真试验包括辐射式和注入式两种模式,注入式试验模式,由于被试验装备的红外成像系统不直接参与仿真试验,因而需要对其红外成像系统效应进行建模与仿真。红外成像系统效

收稿日期:2003-04-06; 修订日期:2003-06-20

作者简介:吴军辉(1968-),男,江西新余人,高级工程师,硕士,主要从事光电测试研究,发表论文数篇。

应包括光学系统效应、器件空间、时间积分效应、探测器噪声效应以及器件非均匀性效应,光学系统效应是红外成像系统效应仿真的重点之一。

对于非相干红外成像系统,光学系统变换特性和成像质量用调制传递函数或点扩展函数来描述。在红外动态景像仿真中,重点仿真光学系统的像弥散/能量分散效应,探讨基于调制传递函数或点扩展函数的光学系统效应模型,并针对衍射限光学系统进行实例计算。

1 光学系统效应模型

光学系统的作用就是将物方的景物转换为像平面的像,对于某一局部物/像空间,可以把光学系统当成线性时不变系统,用光学传递函数 $OTF(f_x, f_y)$ 或点扩展函数 $h(x, y)$ 描述,光学传递函数和点扩展函数互为傅里叶变换、反变换关系,即:

$$OTF(f_x, f_y) = \iint_{-\infty+\infty} h(x, y) e^{-i2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy \quad (1)$$

$$h(x, y) = \iint_{-\infty-\infty} OTF(f_x, f_y) e^{i2\pi(f_x x + f_y y)} df_x df_y \quad (2)$$

$$OTF(f_x, f_y) = MTF(f_x, f_y) e^{iPTF(f_x, f_y)} \quad (3)$$

式中 x, y 为空间变量,分别表示方位角和高低角; f_x, f_y 为空间频率变量,分别表示方位和高低方向的空间频率; $MTF(f_x, f_y)$ 为调制传递函数或振幅传递函数; $PTF(f_x, f_y)$ 为位相传递函数。

严格地讲,由于光学系统不同视场空间处的像差不同, $OTF(f_x, f_y)$ 和 $h(x, y)$ 均与 (x, y) 有关,也就是说不同 (x, y) 处有不同的 $OTF(f_x, f_y)$ 和 $h(x, y)$ 函数形式。作为近似处理,认为 $OTF(f_x, f_y)$ 和 $h(x, y)$ 在全工作视场内具有相同的函数形式。作进一步近似处理,认为光学系统像弥散斑为圆对称,即:

$$OTF(f_x, f_y) = OTF(f_r) \quad (4)$$

$$h(x, y) = h(r) \quad (5)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (6)$$

$$f_r = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (7)$$

式中 r, f_r 分别为径向空间和径向空间频率。

为减少数值计算量,限定 $h(r)$ 和 $OTF(f_r)$ 的定义域有效区间分别为 $[0, r_c], [0, f_c]$, 区间外的值为 0, 并且:

$$MTF(0) = 1 \quad (8)$$

$$2\pi \int_0^{r_c} r h(r) dr = 1 \quad (\text{能量守恒}) \quad (9)$$

光学系统效应模型用下式表述:

$$E(x, y) = \frac{\tau_{\text{opt}} A_{\text{opt}}}{l_2^2} \iint_{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} \leq r_c} h(x', y') \times P(x-x', y-y') dx' dy' = \frac{\tau_{\text{opt}} A_{\text{opt}}}{l_2^2} P(x, y) * h(x, y) \quad (10)$$

$$P(x, y) = L(x, y) \cos[\theta(x, y)] \quad (11)$$

式中 $E(x, y)$ 为像面 (x, y) 处辐射照度; $L(x, y)$ 为物面 (x, y) 处波段辐射亮度; $\theta(x, y)$ 为物面 (x, y) 处辐射面法线与视线夹角; τ_{opt} 为光学系统透过率; A_{opt} 为光学系统有效通光面积; l_2 为像距。

如果给出了光学系统的点扩展函数,可以直接利用公式(10)和(11)求解,但一般情况下,给出的是光学系统的调制传递函数,需要由调制传递函数求解点扩展函数。

基于 $h(x, y)$ 的圆对称和能量守恒特性,对于 $P(x, y)$ 相同的物面区域,光学系统模型可以简化为:

$$E(x, y) = \frac{\tau_{\text{opt}} A_{\text{opt}}}{l_2^2} P(x, y) \quad (12)$$

如果红外成像系统探测背景是均匀的,如对空探测情况,则大多数空间的 $P(x, y)$ 相同,只需在以目标或其他与背景不一致的杂物为中心的局部区域内按公式(10)计算像面辐射照度,这样可以大大减少计算量。局部区域的范围为目标或杂波区域外延 r_c 后的区域。

2 由调制传递函数计算点扩展函数

由于 $h(x, y)$ 是圆对称的,下面针对一维(x 空间)情况进行讨论,并经过推广到二维情况。

一维 $h(x) = h(x, y)|_{y=0}$ 应具备如下性质:

- (1) 偶对称, 即 $h(x) = h(-x)$;
- (2) $h(x)$ 为实数, 且 $h(x) \geq 0$;

则一维 $OTF(f_x) = OTF(f_x, f_y) |_{f_y=0}$ 为:

$$OTF(f_x) = 2 \int_0^{r_c} h(x) \cos(2\pi f_x x) dx \quad (13)$$

由公式(13)和 $h(x)$ 可得 $OTF(f_x)$ 的性质:

- (1) $OTF(f_x)$ 为实数;
- (2) $OTF(f_x)$ 偶对称, $OTF(f_x) = OTF(-f_x)$;

由此可认为, 在 $h(x)$ 两个性质具备的情况下, 调制传递函数 $MTF(f_x)$ 就是光学传递函数 $OTF(f_x)$;

(3) 存在截止频率 f_c , 并且 $f_c \leq f_{ed}$, f_{ed} 为衍射限截止频率, $f_{ed} = D_{opt}/\lambda$, D_{opt} 为光学系统有效口径;

(4) 如果没有大的像差存在, $OTF(f_x) \geq 0$ 。

在以上 4 条性质的基础上, 可以由 $MTF(f_x)$ 计算 $h(x)$ 的离散周期序列 $\bar{h}(n)$:

$$\bar{h}(n) = \frac{1}{2N} \sum_{k=-N+1}^{N-1} \overline{MTF}(k) e^{i(\pi/N)kn} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} \overline{MTF}(k) \cos\left(\frac{\pi kn}{N}\right) + \frac{\overline{MTF}(0)}{2N} \quad (14)$$

$$\overline{MTF}(k) = MTF\left[\left((k+N) \bmod 2N\right) - N\right] f_s \quad (15)$$

$$\bar{h}(n) = h\left[\left((n+N) \bmod 2N\right) - N\right] x_s \quad (16)$$

并且:

$$MTF(Nf_s) = MTF(-Nf_s) = 0 \quad (17)$$

式中 x_s 为空间域采样间隔; f_s 为频率域采样间隔; $2N$ 为一个周期内的采样点数。 x_s, f_s, N 的取值为:

$$x_s = 1/2f_c \quad (18)$$

$$f_s = 1/2r_c \quad (19)$$

$$N = r_c/x_s = f_c/f_s = 1/x_s f_s \quad (20)$$

$h(x)$ 的计算公式为:

$$h(x) = b \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \bar{h}(n) \text{sinc}[\pi(x - nx_s)/x_s] \approx$$

$$b \sum_{n=-N}^N \bar{h}(n) \text{sinc}[\pi(x - nx_s)/x_s] \quad x \in [-r_c, r_c] \quad (21)$$

$$h(x) = 0 \quad x \notin [-r_c, r_c] \quad (22)$$

其中:

$$b = 1/\left[2\pi \int_0^{r_c} xh(x) dx\right] \quad (23)$$

对应二维情况, 即:

$$h(r) = h(x, y) = h(\sqrt{x^2 + y^2}) = h(x, 0) |_{x=r} = h(x) |_{x=r} \quad (24)$$

3 衍射限光学系统

高质量的光学系统应该接近衍射限系统, 其调制传递函数和点扩展函数完全由光学系统有效口径 D_{opt} 和平均工作波长 λ_{ave} 决定。 $MTF(f_r)$ 为:

$$MTF(f_r) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1}\left(\frac{f_r}{f_{ed}}\right) - \frac{f_r}{f_{ed}} \sqrt{1 - \left(\frac{f_r}{f_{ed}}\right)^2} \right] & f_r \leq f_{ed} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

式中 f_{ed} 为衍射限截止空间频率, $f_{ed} = D_{opt}/\lambda_{ave}$ 。

有关参数的取值、计算值见表 1。 $\overline{MTF}(k)$ 的计算结果见表 2。 $MTF(f_x)$ 曲线如图 1(a) 所示。 $\bar{h}(n)$ 的计算结果见表 3。 $h(x)/b$ 曲线如图 1(b) 所示, 其中 $b = 1/167.455$ 。

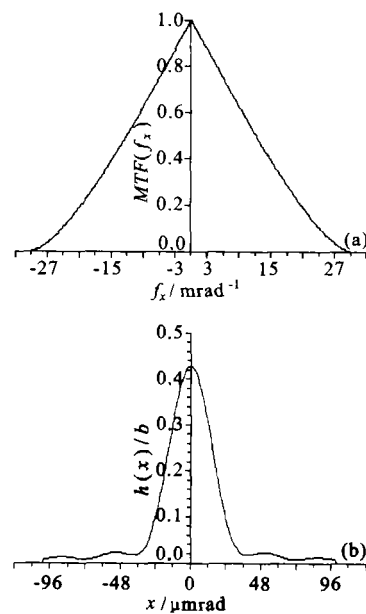


图 1 $MTF(f_x)$ 及 $h(x)/b$ 曲线
Fig. 1 Curve of $MTF(f_x)$ and $h(x)/b$

表 1 参数取值、计算值($r_d=1.22\lambda_{ave}/D_{opt}$ 为衍射斑半径)

Parameters	D_{opt} /mm	λ_{ave} / μm	r_d /mrad	f_{ed} /mrad ⁻¹	r_c /mrad
Value	120	10	0.1	30	0.1
Parameters	f_c /mrad ⁻¹	x_s /mrad	f_s /mrad ⁻¹	2N	
Value	30	1/60	5	12	

表 2 $\overline{MTF}(k)$ 计算结果

K	-6	-5	-4	-3	-2	-1
$\overline{MTF}(k)$	0	0.079 6	0.219 1	0.391 0	0.583 6	0.788 8
K	0	1	2	3	4	5
$\overline{MTF}(k)$	1.000 0	0.788 8	0.583 6	0.391 0	0.219 1	0.079 6

4 结束语

光学系统的像弥散/能量分散会影响红外成像系统的 MRTD 值以及对小目标和细纹理目标的探测,在建立光学系统效应模型时,这一效应必须重点考虑。建立一种近似的光学系统效应模型及点扩展函

表 3 $\bar{h}(n)$ 计算结果

n	-6	-5	-4	-3	-2	-1
$\bar{h}(n)$	0.007 2	0.011 3	0.009 2	0.022 6	0.023 6	0.216 1
n	0	1	2	3	4	5
$\bar{h}(n)$	0.427 0	0.216 1	0.023 6	0.022 6	0.009 2	0.011 3

数处理办法,在仿真实践中有一定的参考作用,并且有待于进一步完善。

参考文献:

- [1] 李祥,汤心益,施家明. 红外动态景象仿真中探测器效应的研究[J]. 量子电子学报, 2001,18(增刊):20-25.
- [2] 吴亚平,张天序. 红外图像的计算机仿真及仿真软件[J]. 红外与激光工程, 2000,29(4):1-3.
- [3] 顾德门 J W. 傅里叶光学导论[M]. 北京:科学出版社,1979.
- [4] 李素芝,万建伟. 时域离散信号处理[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2000.
- [5] 王万兴. 红外光学系统[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1990.
- [6] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京:北京理工大学出版社,1988.

本刊加入“万方数据——数字化期刊群”的声明

为了实现期刊编辑、出版工作的网络化,我刊现已入网“万方数据——数字化期刊群”,所以,向本刊投稿并录用的稿件,将一律由编辑部统一纳入“万方数据——数字化期刊群”,进入因特网提供信息服务。凡有不同意见者,请另投它刊或特别声明需另作处理。本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬,不再另付。

本刊全文内容按照统一格式制作,读者可上网查询浏览,并征订本刊。

《红外与激光工程》编辑部