

# 时延成象系统的动象传递特性

朱 克 正

(西安应用光学研究所)

## 提 要

本文从本质上阐明了时延成象系统的动象传递过程,提出了求解动象线扩展函数及其频谱的数学物理模型。按此模型,导出了匀速动象与简谐振动动象的线扩展函数及其频谱的解析表达式,列出了计算结果,并进行了讨论。

在摄影系统特别是航空摄影系统中,象动的影响较严重,已经发表了一系列有关动象象质的文献<sup>[1~3]</sup>。但是直到目前为止,分析一般时延成象系统动象传递特性的文献很少。Laiwson<sup>[4]</sup>曾提到应考虑荧光屏余辉对象增强器性能的影响,但未介绍具体内容。因此,有必要深入探讨这方面的问题。

## 一、基本数学物理模型

对于时延成象系统,其静象线扩展函数(LSF)一般可表为<sup>[5]</sup>

$$a_0(x, t) = \exp[-\alpha^2 x^2 - (t/\tau_s)], \quad (1)$$

式中 $\alpha^2$ 为系统的横向象差方差的倒数, $\tau_s$ 为系统的时间常数,实际上是其中敏感元件的时间常数。(1)式表明,静象 LSF 可表示为时域和空域的可分离变量函数,即静象 LSF 可表示为空域 LSF( $e^{-\alpha^2 x^2}$ )和时域 LSF( $e^{-t/\tau_s}$ )之积。

动象 LSF 的形成过程如下:

当一直线物( $\delta_x$ 函数)相对于系统沿 $x$ 轴运动时,则在象面上直线物的静象——静象 LSF 也沿 $x$ 轴作相应的运动。

设在 $t \sim t + \Delta t$ 时间间隔内,静象 LSF 的位移为 $x \sim x + \Delta x$ ,则由(1)式可得,静象 LSF 幅度的变化为 $\exp(-t/\tau_s) dt$ 。因 $x = x(t)$ , $t = t(x)$ ,可得

$$\exp(-t/\tau_s) dt = \exp[-t(x)/\tau_s] \left( \frac{dt}{dx} \right) dx = \frac{\exp[-t(x)/\tau_s]}{v[t(x)]} dx。$$

上式表明,静象 LSF 沿 $x$ 轴的幅度分布不仅与时延特性有关,而且与象速有关。

图象作匀速运动时, $\Delta x = v_0 \Delta t$ ,即相等的象移相应于相等的时延。这时 $x$ 与 $t$ 成线性关系,且 $v_0$ 与 $t$ 或 $x$ 无关。因此,静象 LSF 的幅度沿 $x$ 轴仍按指数律变化。匀速动象 LSF 形成过程的示意图如图 1 所示,纵坐标 $a_0(x, t)$ 表示静象 LSF,两横坐标 $x$ 与 $t$ 分别表示象移与时延。图中的点划线表示静象 LSF 序列幅度的包络。图 1 表明,有时延特性的系统由于

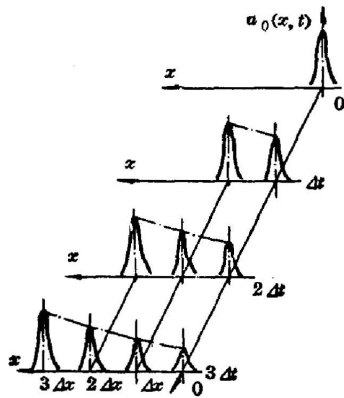


图1 匀速动象 LSF 形成示意图

Fig. 1 Diagram for forming LSF of an image under uniform motion

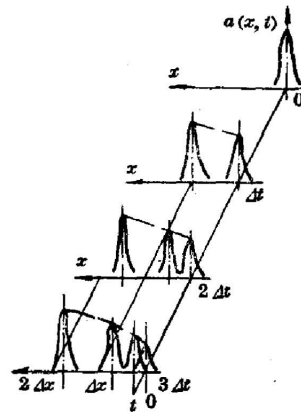


图2 变速动象 LSF 形成示意图

Fig. 2 Diagram for forming LSF of an image under variable motion

物体运动,引起象面上的象作匀速运动,从而形成一个其幅度按指数律衰减的静象 LSF 序列。

当图象作变速运动时,情况较为复杂:由于  $\Delta x = v(t) \Delta t = v(x) \Delta t$ ,即象速与  $x$  有关,所以相等的象移相应于不等的时延,从而产生以下两种效应:(1)  $x$  与  $t$  不再成线性关系,静象 LSF 的幅度沿  $x$  轴不再按指数律变化,变为  $\exp[-t(x)/\tau_s]$  分布;(2)  $\Delta x$  与  $\Delta t$  不再成正比,且象速与  $x$  有关;同样的象移,在象速小的区域相应于较长的时延,因此,静象 LSF 幅度的衰减较强。这表明,静象 LSF 序列的幅度分布还受到象速的调制。变速动象 LSF 形成过程如图 2 所示,由  $t = \Delta t$  开始,象速变小,从而象移变小。因此,静象 LSF 序列变窄;同时,在象速小的区域,静象 LSF 密集,其幅度衰减也较快。

如上所述,就是这个幅度受到时延特性和象速调制的静象 LSF 序列,沿  $x$  轴按位置迭加的结果,形成了空域动象 LSF。设  $t=0$  时,直线性物的象—静象 LSF 位于  $x=x_0$  处,当  $t=\tau_H$  时,静象 LSF 移至  $x_H$  处,则空域动象 LSF 可用如下的卷积积分表示:

当  $v[t(\xi)] > 0$ ,即静象 LSF 沿  $x$  轴正向移动时

$$\left. \begin{aligned} a(x, x_H) &= \int_{x_0}^{x_H} \exp[-\alpha^2(x-\xi)^2] O(\xi) d\xi, \\ O(\xi) &= \exp[t(\xi)/\tau_s] / v[t(\xi)] \quad (x_0 \leq \xi \leq x_H). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

当  $v[t(\xi)] < 0$ ,即象移沿  $x$  轴负向时

$$\left. \begin{aligned} a(x, x_H) &= \int_{x_H}^{x_0} \exp[-\alpha^2(x-\xi)^2] O(\xi) d\xi, \\ O(\xi) &= \exp[t(\xi)/\tau_s] / |v[t(\xi)]| \quad (x_H \leq \xi \leq x), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $a(x, x_H)$  表示  $t = \tau_H$  时刻的空域动象 LSF,  $\tau_H$  称为系统的工作时间,相当于夜视仪器人眼的积分时间或电视系统的帧时间。 $O(\xi)$  是静象 LSF 幅度的包络,称之为理想的或无象差的时延成像系统的空域动象 LSF。(2)式和(3)式表明,实际时延成像系统的空域动象 LSF 可由其静象 LSF 与理想时延成像系统空域动象 LSF 的卷积积分求出, $O(\xi)$  取决于系统的时延特性和象动情况。显然,实际空域动象 LSF 的频谱  $A(\omega_x, x_H)$  可表为静象 LSF 的频谱  $A_0(\omega_x)$  与理想空域动象 LSF 的频谱  $A_1(\omega_x, x_H)$  的乘积,即

$$A(\omega_x, x_H) = A_0(\omega_x) A_1(\omega_x, x_H), \tag{4}$$

$A_1(\omega_x, x_H)$ 集中地体现了象动对时延成象系统成象特性的影响,称为空域动象谱衰减函数,它可按式求出:

$$A_1(\omega_x, x_H) = \int_{x_0}^{x_H} O(x) \exp(-i\omega_x x) dx. \tag{5}$$

设静象 LSF 已知,如(1)式所示,则  $A_0(\omega_x)$  很容易求出.必须指出,本文所提出的数学物理模型对其它形式的静象 LSF 也适用。

## 二、匀速空域动象 LSF 与空域动象谱衰减函数

在匀速动象情况下,在  $\tau_H$  时间间隔内,象移的距离  $d = |x_H - x_0| = |v_0| \tau_H$ 。若象移沿  $x$  轴负向,由(3)式可知,匀速空域动象 LSF 可表示为

$$a(x, d) = \int_0^d \exp[-\alpha^2(x-\xi)^2 - \xi/x_s] d\xi / |v_0|, \tag{6}$$

式中  $\xi = |v_0|t$ ,  $x_s = |v_0|\tau_s$ 。为书写简便起见,下面用  $v_0$  代替  $|v_0|$ ,它表示速度的绝对值。理想空域动象 LSF 如图 3 所示。

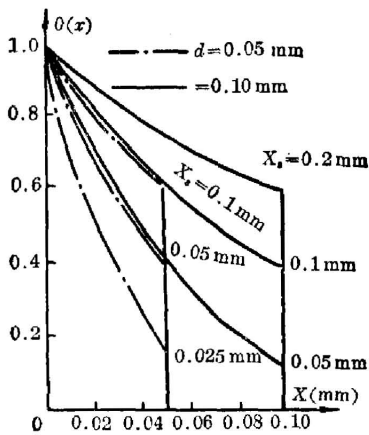


图 3 理想的匀速动象 LSF  
Fig. 3 Ideal LSF of an image under uniform motion

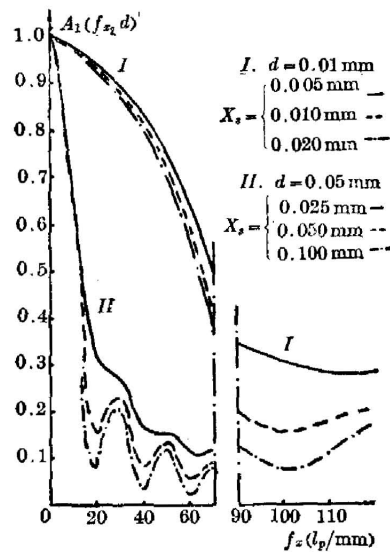


图 4 匀速动象谱衰减函数曲线  
Fig. 4 Attenuation function of spectrum of an image under uniform motion

由(5)式可得匀速空域动象谱衰减函数

$$\begin{aligned} A_1(\omega_x, d) &= \int_0^d \exp(-x/x_s) \exp(-i\omega_x x) dx / v_0 \\ &= \frac{x_s}{v_0(1+i\omega_x x_s)} \{1 - \exp[-(d/x_s) - i\omega_x d]\}, \end{aligned} \tag{7}$$

对零频归一化,  $A_1(\omega_x, d)$  的模可表示为

$$|A_1(\omega_x, d)| = \frac{1}{1 - \exp(-d/x_s)} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_x x_s)^2}} \times [1 - 2 \cos(\omega_x d) \exp(-d/x_s) + \exp(-2d/x_s)]^{1/2}, \quad (8)$$

若注意到  $d = v_0 \tau_H$ ,  $x_s = v_0 \tau_s$  和空间频率  $f_x = \omega_x / 2\pi$ , 根据 (8) 式可写出  $|A_1(\omega_x, \tau_H)|$ ,  $|A_1(f_x, \tau_H)|$ 。从 (8) 式可知, 当象移沿  $x$  轴正向,  $d$  左边的符号改变时,  $|A_1(f_x, \tau_H)|$  的值不变, 仅引起  $A_1(f_x, \tau_H)$  的幅角改变。按 (8) 式算得的几种典型情况下的  $|A_1(f_x, \tau_H)|$  如图 4 所示。由 (8) 式及其计算结果可以看出:

(1) 当  $(d/x_s) = (\tau_H/\tau_s) \rightarrow \infty$  时,

$$|A_1(\omega_x, d)| \rightarrow \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_x v_0 \tau_s)^2}},$$

这时, 空域动象谱衰减函数的模主要取决于系统的时延特性所引起的理想空域动象 LSF 的变形。这相当于系统工作时间与时间常数相比甚大的情况。当  $\tau_s \rightarrow 0$  时,  $|A_1(\omega_x, d)| \rightarrow 1$ 。这种系统实际上是非时延成象系统, 自然, 空域动象谱衰减函数的模等于 1;

(2) 当  $(d/x_s) = (\tau_H/\tau_s) \rightarrow 0$  时,

$$|A_1(\omega_x, d)| \rightarrow \left| \frac{\sin(\omega_x d/2)}{(\omega_x d/2)} \right|。$$

这时, 空域动象谱衰减函数的模主要取决于象移所引起的理想空域动象 LSF 的展宽效应。这相当于系统的工作时间与其时间常数相比甚小的情况。若  $\tau_H$  保持定值,  $\tau_s \rightarrow \infty$ , 这种系统称之为无限时延系统或永久记忆系统, 摄影系统就属于这种情况。显然, 理想空域动象 LSF 为一方波, 故  $|A_1(\omega_x, d)|$  取窗口函数或  $\text{sinc}$  函数形式。若  $d \rightarrow 0$ , 则  $|A_1(\omega_x, d)| \rightarrow 1$ 。这表明, 象速极小或系统工作时间极短时, 象移所引起的空域动象谱衰减作用趋于消失。

(3) 当  $(d/x_s) = (\tau_H/\tau_s)$  取有限值时, 这种系统称之为有限时延成象系统。 $|A_1(\omega_x, d)|$  曲线多由  $\omega_x d = 2\pi$  起开始振荡, 振荡的周期为  $\omega_x d = 2\pi$ 。当  $d$  较小时, 曲线在较高的  $\omega_x$  处出现第一波谷, 而且升高。它体现了象移所引起的动象谱衰减作用。在  $|A_1(\omega_x, d)|$  曲线的各个波谷处,

$$|A_1(\omega_x, d)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_x x_s)^2}}。$$

当  $d$  一定,  $x_s$  较小时,  $|A_1(\omega_x, d)|$  在第一波谷处取较高值。它体现了时延特性所引起的动象谱衰减作用。

总之,  $d$ ,  $x_s$  均对空域动象谱衰减函数有明显的影响。例如, 当象移只有 0.01 mm 时, 在空间频率  $f_x = 50 \text{ lp/mm}$  处,  $|A_1(\omega_x, d)|$  已下降到 65%。这足以说明, 当目标相对于时延成象系统运动时, 象质的衰减是比较严重的。

### 三、简谐振动空域动象 LSF 与空域动象谱衰减函数

设直线物的静象——静象 LSF 在象面上沿  $x$  轴作简谐振动, 其运动方程为

$$x = x_m \cos \omega t, \quad \dot{x} = -x_m \omega \sin \omega t。 \quad (9)$$

由上式得

$$v(x) = \pm x_m \omega \sqrt{1 - (x/x_m)^2}, \quad t(x) = [\arccos(x/x_m)]/\omega。 \quad (10)$$

如(1)式所述,系统的时延特性仍用  $\exp(-t/\tau_s)$  表示。在前半周期末,静象 LSF 由  $-x_m$  到  $x_m$  刚刚走完一个单程。将(10)式的  $t(x)$ 、 $v(x)$  代入(2)式,可得系统的空域动象 LSF 为

$$a_1(x, x_m) = \int_{-x_m}^{x_m} \exp[-\alpha^2(x-\xi)^2] \frac{\exp[-(1/\omega\tau_s)\arccos(\xi/x_m)]}{\sqrt{1-(\xi/x_m)^2}} d\xi. \quad (11)$$

到后半周期末,静象 LSF 由  $x_m$  返回到  $-x_m$ , 即与前半周期运动方向相反。仅由这后半周期内静象 LSF 移动所形成的动象 LSF 为

$$a_2(x, x_m) = \int_{-x_m}^{x_m} \exp[-\alpha^2(x-\xi)^2] \frac{\exp[(1/\omega\tau_s)\arccos(\xi/x_m)]}{\sqrt{1-(\xi/x_m)^2}} d\xi. \quad (12)$$

必须指出,若令  $x=x_m$  和  $-x_m$  时,  $\arccos(x/x_m)=0$  和  $\pi$ , 为表明运动方向不同所引起的时延效应,必须在(11)式的指数项引入负号。

综上所述,经过一个周期,静象 LSF 往复运动所形成的空域动象 LSF 可表为

$$\begin{aligned} a(x, x_m) &= a_1(x, x_m) + a_2(x, x_m) \\ &= \int_{-x_m}^{x_m} \frac{\exp[-\alpha^2(x-\xi)^2]}{\sqrt{1-(\xi/x_m)^2}} \{ \exp[-(1/\omega\tau_s)\arccos(\xi/x_m)] \\ &\quad + \exp[(1/\omega\tau_s)\arccos(\xi/x_m)] \} d\xi. \end{aligned} \quad (13)$$

由上式可得理想动象 LSF 为

$$\begin{aligned} O(x/x_m) &= \frac{\exp[-(1/\omega\tau_s)\arccos(x/x_m)] + \exp[(1/\omega\tau_s)\arccos(x/x_m)]}{\sqrt{1-(x/x_m)^2}} \\ &= 2 \operatorname{ch}[(1/\omega\tau_s)\arccos(x/x_m)] / \sqrt{1-(x/x_m)^2} \quad [-1 \leq (x/x_m) \leq 1]. \end{aligned} \quad (14)$$

按上式算得的典型情况下的理想动象 LSF 如图 5(a) 与图 5(b) 所示。

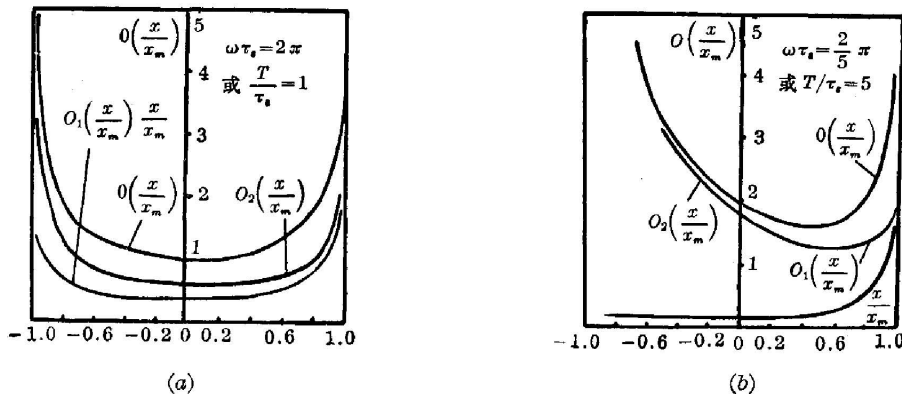


图 5

(a) 理想的简谐振动动象 LSF (一); (b) 理想的简谐振动动象 LSF (二)

Fig. 5

- (a) Ideal LSF of an image under simple harmonic motion (1);
- (b) Ideal LSF of an image unple simple harmonic motion (2)

下面求简谐振动动象谱衰减函数  $A(\omega_x, x_m)$ 。按傅里叶变换定理,两函数和的傅里叶变换等于各自傅里叶变换之和。为明确起见,先求与  $a_1(x, x_m)$  相应的动象谱衰减函数

$$A_1(\omega_x, x_m) = \int_{-x_m}^{x_m} \frac{\exp[-(1/\omega\tau_s)\arccos(x/x_m)]}{\sqrt{1-(x/x_m)^2}} e^{-i\omega_x x} dx. \quad (15)$$

设  $x/x_m = \cos \eta$ ,  $\eta = \arccos(x/x_m)$ , 代入上式并根据贝塞尔函数性质<sup>[6]</sup>, 经整理后可得

$$\begin{aligned} A_1(\omega_x, x_m) &= J_0(\omega_x, x_m) \int_0^\pi e^{-\eta/\omega\tau_s} d\eta + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-i)^k J_k(\omega_x, x_m) \int_0^\pi e^{-\eta/\omega\tau_s} \cos k\eta d\eta \\ &= (\omega\tau_s) J_0(\omega_x, x_m) (1 - e^{-\pi/\omega\tau_s}) \\ &\quad + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-i)^k J_k(\omega_x, x_m) \frac{(1/\omega\tau_s) [1 - \exp(-\pi/\omega\tau_s) \cos k\pi]}{(1/\omega\tau_s)^2 + k^2} \circ \end{aligned}$$

按同法可得

$$\begin{aligned} A_2(\omega_x, x_m) &= (\omega\tau_s) J_0(\omega_x, x_m) (e^{\pi/\omega\tau_s} - 1) \\ &\quad + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-i)^k J_k(\omega_x, x_m) \frac{(1/\omega\tau_s) [\exp(\pi/\omega\tau_s) \cos k\pi - 1]}{(1/\omega\tau_s)^2 + k^2}, \end{aligned}$$

式中  $J_k$  表示  $k$  阶第一类贝塞尔函数。将前两式相加, 经整理可得一个周期末的简谐振动动象谱衰减函数为

$$\begin{aligned} A(\omega_x, x_m) &= A_1(\omega_x, x_m) + A_2(\omega_x, x_m) \\ &= 2(\omega\tau_s) J_0(\omega_x, x_m) \operatorname{sh}(\pi/\omega\tau_s) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-i)^k J_k(\omega_x, x_m) \frac{(2/\omega\tau_s) \operatorname{sh}(\pi/\omega\tau_s) \cos k\pi}{(1/\omega\tau_s)^2 + k^2} \\ &= 2(\omega\tau_s) \operatorname{sh}(\pi/\omega\tau_s) \left[ J_0(\omega_x, x_m) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-i)^k J_k(\omega_x, x_m) \cos k\pi / 1 + (k\omega\tau_s)^2 \right]. \quad (16) \end{aligned}$$

当  $k=2n$  为偶数时

$$A_{2n}(\omega_x, x_m) = J_0(\omega_x, x_m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\omega_x, x_m) / 1 + (2n\omega\tau_s)^2 \circ$$

当  $k=2n-1$  为奇数时

$$A_{2n-1}(\omega_x, x_m) = -2i \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\omega_x, x_m) / 1 + [(2n-1)\omega\tau_s]^2 \circ$$

前两式已经对零频归一化。因此, 简谐振动动象谱衰减函数可表为

$$\begin{aligned} A(\omega_x, x_m) &= \left[ J_0(\omega_x, x_m) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\omega_x, x_m) / 1 + (2n\omega\tau_s)^2 \right] \\ &\quad - 2i \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\omega_x, x_m) / 1 + [(2n-1)\omega\tau_s]^2 \circ \quad (17) \end{aligned}$$

将简谐振动周期  $T = 2\pi/\omega$  代入上式得

$$\begin{aligned} A(\omega_x, x_m) &= \left[ J_0(\omega_x, x_m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\omega_x, x_m) / 1 + (4n\pi\tau_s/T)^2 \right] \\ &\quad - 2i \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\omega_x, x_m) / 1 + [2(2n-1)\pi\tau_s/T]^2 \circ \end{aligned}$$

$A(\omega_x, x_m)$  的模为

$$\begin{aligned} |A(\omega_x, x_m)| &= \left\{ \left[ J_0(\omega_x, x_m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\omega_x, x_m) / 1 + (2n\omega\tau_s)^2 \right]^2 \right. \\ &\quad \left. + \left[ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\omega_x, x_m) / 1 + [(2n-1)\omega\tau_s]^2 \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (18) \\ |A(\omega_x, x_m)| &= \left\{ \left[ J_0(\omega_x, x_m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\omega_x, x_m) / 1 + (4n\pi\tau_s/T)^2 \right]^2 \right. \\ &\quad \left. + \left[ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\omega_x, x_m) / 1 + [2(2n-1)\pi\tau_s/T]^2 \right]^2 \right\}^{1/2} \circ \end{aligned}$$

按(18)式算得的典型情况下的简谐振动空域动象谱衰减函数的模的曲线如图6所示。

以上讨论了一个周期末的简谐振动空域动象谱衰减函数。由此很容易推出  $n$  个周期末

的动象谱衰减函数

$$\begin{aligned} A_t(\omega_x, x_m) &= A(\omega_x, x_m) \{1 + \exp(-2\pi/\omega\tau_s) \\ &\quad + \exp(-4\pi/\omega\tau_s) + \dots + \exp[-2(n-1)\pi/\omega\tau_s]\} \\ &= A(\omega_x, x_m) \{1 + \exp(-T/\tau_s) \\ &\quad + \exp(-2T/\tau_s) + \dots + \exp[-(n-1)T/\tau_s]\}. \end{aligned}$$

因  $\exp(-T/\tau_s) < 1$ , 并考虑  $t = nT$ , 得

$$A_t(\omega_x, x_m) = \frac{[1 - \exp(-t/\tau_s)] A(\omega_x, x_m)}{1 - E},$$

式中  $E = \exp(-T/\tau_s)$ , 它取决于简谐振动周期与系统时间常数之比。

在系统工作时间内, 即  $t = \tau_H$  时

$$A_{\tau_H}(\omega_x, x_m) = \frac{1 - \exp(-\tau_H/\tau_s)}{1 - E} A(\omega_x, x_m).$$

上式表明, 只要系统工作时间是简谐振动周期的整数倍, 空域动象谱衰减函数不变。即随着时间的推移, 直线物重复地作周期运动, 这仅仅是使理想动象 LSF 在空间各点的强度等比例地增大, 并不改变它的形状。因此, 空域动象谱衰减函数不变。按上述方法也可导出

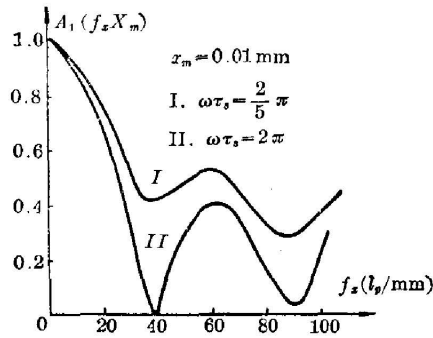


图 6 简谐振动动象谱衰减函数曲线  
Fig. 6 Attenuation function of spectrum of an image under simple harmonic motion

$t \neq nT$  时的动象谱衰减函数, 因为这属于特殊情况, 故不进行讨论。

由上述结果可以看出:

(1) 当  $\omega\tau_s \rightarrow \infty$  或  $T/\tau_s \rightarrow 0$  时,  $R_{2n}$  与  $R_{2n-1} \rightarrow 0$ , 可得  $A(\omega_x, x_m) = J_0(\omega_x, x_m)$ 。这与摄影系统已有结果是一致的<sup>[2]</sup>。上式表明,  $T/\tau_s \rightarrow 0$  时, 时延特性对静象 LSF 幅度的调制作用趋于消失。这时, 静象 LSF 序列沿  $x$  轴的幅度分布只受到象速的调制。如前所述,  $\tau_s \rightarrow \infty$  时, 系统为无限时延系统或摄影系统。当  $\tau_s$  取定值, 而简谐振动周期很短或频率很高时, 由于振动很快, 时延特性的影响来不及显示出。因此, 动象谱衰减函数也只体现速度调制作用。

(2) 当  $\omega\tau_s \rightarrow 0$  时, 动象谱衰减函数趋于 1。这相当于静象或无时延系统的情况。

(3)  $\omega\tau_s$  或  $T/\tau_s$  取有限值时, 动象谱衰减函数的模如图 6 所示。当  $\omega\tau_s = 2\pi$  或  $T/\tau_s = 1$  时,  $A(\omega_x, x_m)$  接近于  $J_0(\omega_x, x_m)$ , 这时高阶贝塞尔函数项的影响较小。当  $\omega\tau_s = 2/5\pi$  或  $T/\tau_s = 5$  时, 高阶贝塞尔函数项的影响很明显, 整个曲线升高, 起伏减弱。这表明, 简谐振动的频率降低或者时间常数减小时, 动象谱衰减函数值升高, 即象动所引起的象质衰减效应降低。如上所述, 当  $\omega\tau_s \rightarrow 0$  时,  $A(\omega_x, x_m) \rightarrow 1$ 。

## 四、结 论

本文阐明了时延成象系统的动象传递过程, 提出了求解动象 LSF 与动象谱衰减函数的数学物理模型, 并以匀速动象和简谐振动动象为例, 进行了分析讨论。由此得出如下结论:

(1) 在时延成象系统传递动象过程中, 在象面上, 沿  $x$  轴形成了一个静象 LSF 序列, 这些静象 LSF 的幅度受到时延特性与象速两方面的调制作用。这个受到调制的静象 LSF 幅度的包络称为理想动象 LSF。此系统的空域动象 LSF 就是静象 LSF 与理想动象 LSF 作

卷积积分所成的象。通过这一过程,使空域静象 LSF 展宽并发生变形。

(2) 由上述过程所引起的象质衰减可用空域动象谱衰减函数表示,它就是理想空域动象 LSF 的傅里叶变换。系统的空域总动象谱就是系统静象谱与动象谱衰减函数的乘积。

(3) 按照上述模型,导出了空域动象 LSF 与动象谱衰减函数的解析表达式;并在匀速动象与简谐振动动象两种情况下,导出了动象 LSF 与动象谱衰减函数公式。这些结果可用于分析计算时延成像系统的动象传递特性。

(4) 本文导出的结果还适用于无限时延系统或摄影系统。当  $\tau_s \rightarrow \infty$  时,由本文中的公式可以导出摄影系统现有的动象谱公式,从而验证了本文导出的结果。

(5) 由计算结果可以看出,象动对时延成像系统的象质有明显的影响。对于夜视仪器或电视跟踪系统,只要目标相对于系统是运动的,就应注意抑制或补偿象动对图象细节的涂抹作用。但当图象含有噪声时,还可适当利用时延特性对噪声的平滑作用。显然,这两种作用是互相矛盾的。利用本文得到的结果,可以分析时延成像系统的传递函数与信噪比,从而找出恰当的途径改善其动象传递特性,以提高系统的性能。

### 参 考 文 献

- [1] В. И. Кононов; «Оптические системы построения изображений», (Киев Технива. 1981), 68.
- [2] 麦伟麟; «光学传递函数及其数理基础», (国防工业出版社, 1979), 305.
- [3] S. Nudelman et al.; «Advances in Electronics & Electron Physics», Vol. 40B, (Academic Press, London, New York, San Francisco, 1976), 539.
- [4] W. Lawson; «Photoelectronic Imaging Devices», Vol. 1, (Plenum Press, New York, London, 1971), 380.
- [5] И. И. Пуккерман; «Преобразования электронных изображений», (Энергия, Ленинградское отделение, 1972), 108.
- [6] 王竹溪, 郭敦仁; «特殊函数概论», (科学出版社, 1965), 397.

## Transfer characteristic of motion image for delay imaging system

ZHU KEZHENG

(Xian Institute of Applied Optics)

(Received 28 June 1983; revised 14 October 1983)

### Abstract

This paper illustrates essentially the transfer process of a motion image for the delay imaging system, and proposes a mathematical and physical models for deriving line spread function of motion image and its frequency spectrum. According to the model, the analytical expressions of the line spread function of an image under uniform motion and simple harmonic motion are derived. Their computational results are given and discussed.