

高速摄影系统的信息量*

陶 纯 堪

(华东工学院光学系)

提 要

根据光学信息论,得到了高速摄影系统的信息量表达式。指出:高速摄影所记录的信息量与目标、高速摄影系统的参数及使用条件有关。

关键词: 信息量; 高速摄影。

一、引 言

高速摄影是人们研究高速和瞬变现象的有力工具,已广泛应用于记录火箭、飞机、发动机的工作过程,探索爆炸、等离子体、激波的各种状态,甚至体育训练也得借助于它,其重要性是尽人皆知的。

然而关于高速摄影系统的信息量这个重要问题,不能说已解决了,有的概念有进一步探讨的必要。

众知,光场信息量可表为^[1~3]

$$I = N_{DOF} \log_2(1+m), \quad (1)$$

式中总自由度数是

$$N_{DOF} = STW\psi, \quad (2)$$

m 为灰阶等级数, S 、 T 、 W 和 ψ 分别为空间、时间、颜色和偏振自由度数。因为讨论任何辐射,都是指出在何时间,何空间位置,何波长,何偏振态下的辐射。通过抽样,决定出时间、空间、波长、偏振自由度数,即决定出是在什么条件下的辐射;再经量化,把辐射分等为 m 。从而最终按(1)式决定总信息量。

设只讨论单色,也不考虑偏振态,则 $W = \psi = 1$ 。有

$$I = TS \log_2(1+m)。 \quad (3)$$

如果令摄影时间为 t , 每相邻两幅画幅的时间间隔为 t_w , 则时间自由度 $T = t/t_w$, 即

$$I = \frac{t}{t_w} S \log_2(1+m)。$$

单位时间内信息量(单位是 bit/sec)为:

$$\frac{I}{t} = PS \log_2(1+m), \quad (4)$$

式中单位时间内的时间自由度 P 为

收稿日期: 1987年2月25日; 收到修改稿日期: 1987年5月25日

* 国家自然科学基金资助的课题。

$$P=1/t_w \quad (5)$$

为比较方便起见, 设 $m=1$, 有

$$I/t=PS \quad (6)$$

H. Shardin 指出高速摄影信息量为^[4~6]

$$I/t=(Pg^{2/3})(Fn^2)\log_2\left(1+\frac{S}{N}\right) \quad (7)$$

为与(6)式比较的方便, 只计其自由度部分, 得

$$I/t=(Pg^{2/3})(Fn^2) \quad (8)$$

式中 F 为画幅面积, n 为某一维上的空间分辨率, P 为单位时间内时间自由度, g 为优质系数, 表为

$$g=t_w/t_B \quad (9)$$

(9)式中 t_B 为一张画幅曝光时间。Schardin 并把 $(Pg^{2/3})$ 和 (Fn^2) 分别称为时间信息和空间信息。为此, 如下各点值得讨论:

1. 如果把空间自由度 S 称为空间信息的话, 则它应当是高速摄影系统工作条件下拍摄高速物体所得一画幅内的空间信息, 而(8)式把拍摄静物时的空间信息 (Fn^2) 作为其空间信息是值得商讨的。

2. 单位时间内时间信息 P , 只应当是每秒钟抽样的次数, 用 $P=1/t_w$ 表示已完善。再增加 $g^{2/3}$ 是多余的。如果按[6]所述拍摄一画幅曝光时间 t_B 变短, 模糊量减少, 画幅变清晰; 恰巧通过(9)式 g 也增高, 则说明它时间信息增高。这是把时间信息和空间信息相混, 值得商讨。

3. 如果把 $g^{2/3}$ 增高所带来的图像清晰与 (Fn^2) 一起归入空间信息 $S=(g^{2/3}Fn^2)$, 也不合适。因为任何高速摄影系统为

$$g^{2/3} \geq 1 \quad (10)$$

则拍摄高速运动物体的 $S=g^{2/3}Fn^2$ 竟比拍摄静物的空间信息 Fn^2 更高, 是不合逻辑的。

澄清这些问题, 解决高速摄影系统信息量问题, 是本文的任务。

二、高速摄影时间自由度

如前所述, t 秒内系统的时间自由度为

$$T=t/t_w \quad (11)$$

而单位时间的自由度为 $P=1/t_w$ 。不同方案下按(6)式计算得单位时间内获得信息量如表1所示。 t_w 每缩短一个数量级, 则 I/t 便提高一个数量级。为此, 主要从两方面入手; (a)对拍摄自发光物体, 是发展高速快门。(b)对拍摄不发光物体, 是发展高功率短脉冲光源。

三、高速摄影空间自由度

在(3)、(4)、(6)式中 S 是指高速摄影条件下每拍一张画幅的空间自由度。那么, S 是否等于用高速摄影系统拍摄静物时的空间自由度呢? 回答是否定的。而是比拍摄静物要低。

Table 1 The values of I/t for various schemes

Scheme	t_w	I/t
Intermittent high speed photography	$0.5 \times 10^{-2} \sim 10^{-3}$	$(2 \times 10^2 \sim 10^3)s$
Image compensation high speed photography	$10^{-2} \sim 10^{-4}$	$(10^2 \sim 10^4)s$
High speed photography with rotating mirror	$10^{-5} \sim 10^{-7}$	$(10^5 \sim 10^7)s$
Raster high speed photography	$0.5 \times 10^{-4} \sim 0.7 \times 10^{-9}$	$(2 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^9)s$
Image converter tube high speed photography	$10^{-4} \sim 10^{-8}$	$(10^4 \sim 10^8)s$

在高速摄影系统内, 总共有如下几种导致像点模糊减小空间自由度的原因:

1. 光学系统成像点扩展函数 $h(x, y)$ 引起的像点模糊。该模糊量并非各向同性, 而是不对称的。其原因在于摄影过程中瞳孔扫描错位。在时间方向上瞳孔孔径变小。在此方向上 $h(x, y)$ 较之拍摄静止物体模糊量增大。而在时间的垂直方向上 $h(x, y)$ 与静止时一样。设为方形瞳孔, $h(x, y)$ 取

$$\left[\frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{W}{f'} x\right)}{\left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{W}{f'} x\right)} \right]^2$$

形式。式中 W 为孔径尺寸, f' 为系统焦距。 $h(x, y)$ 的弥散有 $\Delta x = \lambda \frac{f'}{W}$ 数量级。扫描时, 时间方向孔径 W 减小, 模糊量 Δx 增加。

2. 运动物体的像与胶片之间的相对移动所引起的模糊。

(a) 设胶片不移动。 t_B 方向被拍摄的物体在高速运动, 运动速度为 v , 则物在 v 方向上有 $t_B \cdot v$ 的位移, 其像在胶片上构成模糊, 降低了空间自由度 S 。不论 t_B 多短, 而 $|v|$ 很大, 模糊量也是可观的。

对形状固定的高速物体而言, 在胶片上所构成的沿 v 在像中面的投影方向上的位移量为

$$\Delta l_1 = t_B \cdot v \cos \beta, \quad (12)$$

其中 β 为 v 方向与平面的空间夹角。对形状和体积随高速过程而变化的高速物体, 难以用解析形式表达所造成的像点模糊, 暂不研究。

(b) 设物体静止, 而胶片移动。为使成像清晰而采取不同形式的补偿方案。补偿之后, 在胶片上仍残存沿胶片移动方向上的位移量, 令为 $\vec{\Delta l}_2$ 。在不同使用条件下, $\vec{\Delta l}_1$ 和 $\vec{\Delta l}_2$ 方向相互关系难以确定, $\vec{\Delta l}_1$ 和 $\vec{\Delta l}_2$ 矢量合成的位移差异极大。这种千变万化的不同使用状态不能一一估计到, 只研究位移为

$$\Delta l = |\vec{\Delta l}_1| + |\vec{\Delta l}_2| \quad (13)$$

这种最恶劣情况。

3. 由于胶片的颗粒度致使入射到胶片上一点的光被弥散, 形成点扩展函数 $m(x, y)$ 。设考虑运动物体像与胶片相对移动前光学系统的点扩散函数为 $h(x, y)$, 像面强度分布为 $I_0(x, y)$ 。在考虑(13)式位移下, 点扩展函数为 $h'(x, y)$, 像面强度分布为 $I(x, y)$ 。则

$$I(x, y) = I_0(x - \sigma_0 t, y). \quad (14)$$

这里假设移动是在 x 方向, 式中 v_0 为在 t_B 方向的等效速度, 且 $\Delta l = v_0 \cdot t_B$ 。未考虑 $m(x, y)$ 时, 胶片上曝光量为

$$I_p(x, y) = \int_{-t_B}^{t_B} I_0(x - v_0 t, y) dt. \quad (15)$$

设高速运动物体的强度分布为 $I_k(x, y)$ 。则

$$I_0(x, y) = \iint I_k(x', y') h(x - x', y - y') dx' dy'. \quad (16)$$

有

$$I_p(x, y) = \int_{-t_B}^{t_B} dt \iint I_k(x', y') h(x - v_0 t - x', y - y') dx' dy'. \quad (17)$$

传递函数为

$$\frac{\mathcal{F}\{I_p(x, y)\}}{\mathcal{F}\{I_k(x, y)\}} = h(\omega, x) \cdot t_B \operatorname{sinc}(\omega v_0 t_B / 2), \quad (18)$$

式中 $\mathcal{F}\{\dots\}$ 为傅里叶变换。 ω 和 x 为在 x 和 y 方向频谱。记 $*$ 为卷积符号。所以由 (18) 式得系统在考虑 (13) 式移动下点, 扩展函数为

$$h'(x, y) = h(x, y) * \frac{1}{v_0} \operatorname{rect}\left(\frac{x}{\Delta l}\right). \quad (19)$$

这里

$$\operatorname{rect}(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq \frac{1}{2}, \\ 0 & \text{其余。} \end{cases} \quad (20)$$

而胶片还有 $m(x, y)$ 的扩展, 所以胶片记录下的点扩展函数为 $h''(x, y)$, 则为

$$h''(x, y) = \left\{ h(x, y) * \frac{1}{v_0} \operatorname{rect}\left(\frac{x}{\Delta l}\right) \right\} * m(x, y). \quad (21)$$

所以得

$$S = \frac{F}{\mathcal{D} \left\{ \left[h(x, y) * \frac{1}{v_0} \operatorname{rect}\left(\frac{x}{\Delta l}\right) \right] * m(x, y) \right\}}. \quad (22)$$

这里 $\mathcal{D}\{\dots\}$ 代表括号内点扩展函数第一暗圈内的圆斑面积。

四、胶片的影响

所使用的胶片对高速摄影的信息量起了相当大的影响, 这主要表现在: (a) 胶片颗粒度限制了记录低对比像。(b) 光入射到胶片上一点而被散射到邻近画域, 或在层之间扩散, 从而限制曝光分布中的精细结构。

计算胶片对信息量的影响有两种办法: 一种是基于胶片所记录图像的频率域分析^[7-9], 另一种是基于胶片空间域分析^[9, 10]。在此, 研究时间自由度, 空间自由度, 以及每个自由度上灰阶等级数对信息量的影响, 所以取后一种办法。

设 $D_{\max} - D_{\min}$ 为膜片的光学密度范围, 而 σ_D 为用光学密度标准偏差所表示的颗粒度噪声, 则^[9]

$$m = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{2k\sigma_D}. \quad (23)$$

式中 k 是考虑到能以一个低的误差率去区分 m 个灰阶等级数的一个常量。若 $k=5$, 误差率为 10^{-6} 。 σ_D 与 Selwyn 颗粒度常量 G 的关系为^[8]

$$\sigma_D = \frac{G}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\alpha}} \quad (24)$$

这里 α 为检查胶片颗粒度所使用的扫描孔径面积。

综上所述, 高速摄影系统单位时间总信息量为

$$\frac{I}{t} = \frac{F}{\mathcal{D} \left\{ \left[h(x, y) * \text{rect} \left(\frac{x}{\Delta l} \right) \right] * m(x, y) \right\}} \times \log_2 \left(1 + \frac{D_{\max} - D_{\min}}{2k\sigma_D} \right) \quad (25)$$

(22)式中 $1/v_0$ 并不影响圆斑面积, 在(25)式中已省略。如果为理想补偿, $|\vec{\Delta l}_2| = 0$, 即 Δl 完全是由于物体运动所引起, 且令 $B=0$, 记系统的横向放大率为 M , 则

$$\frac{1}{\Delta l} = \frac{1}{t_B \cdot M \cdot |v|} \quad (26)$$

(25)式成为

$$\frac{I}{t} = P \times \frac{F}{\mathcal{D} \left\{ \left[h(x, y) * \text{rect} \left(\frac{x}{t_B \cdot M \cdot |v|} \right) \right] * m(x, y) \right\}} \times \log_2 \left(1 + \frac{D_{\max} - D_{\min}}{2k\sigma_D} \right) \quad (27)$$

由(25)式和(27)式可以看出, 为提高高速摄影记录信息量的能力, 宜取如下措施:

- (1) 发展短脉冲光源和高速快门, 缩短 t_w 和 t_B , 提高单位时间内时间自由度 P ; 同时也减小 $\text{rect} \left(\frac{x}{\Delta l} \right)$ 引起的弥散, 以提高空间自由度。
- (2) 发展优良的补偿方式。作到高速运动物体的像与胶片的相对运动尽可能消除, 缩小 $\text{rect} \left(\frac{x}{\Delta l} \right)$ 的弥散作用, 以提高空间自由度。
- (3) 发展高性能胶片。这反映在增大光学密度范围和减小 σ_D 以提高胶片的灰阶等级数, 且减小点扩展函数 $m(x, y)$, 提高空间自由度。

作为计算例子, 根据 Shardin 编的表^[9], 本文用(27)式估算了对应的 I/t , 示于表 2。表中, 物尺寸和规定图像尺寸 10 mm 是以放大倍率 M 联系着。而物体速度和图像速度亦用 M 联系着。在给定的位移 Δl 为 10 μm , 100 μm 和 1 mm 条件下, 拍摄频率 P 示于斜线上方, I/t 示于斜线下方。计算中, 取如下初始数据:

- (a) 胶片分辨率为 90 lines/mm, 即 1099 号胶片^[5]。
- (b) 光学系统相对孔径 1/5。
- (c) 胶片灰阶等级数通常为 2~8^[9], 这里取最高, 为 $m=8$ 。
- (d) 波长 $\lambda=500 \text{ nm}$ 。
- (e) 像面尺寸 $18 \times 24 \text{ mm}^2$

表 2 中物体速度和图像速度的单位为 m/sec, I/t 单位为 bit/sec。

五、结 论

信息量, 是通过抽样, 决定出时间、空间、波长, 偏振自由度, 即决定出是在该种条件下的辐射; 再用量化决定出其辐射的强弱, 从而用(1)式定出信息量。单位时间的自由度, 即是拍摄频率 P 。空间自由度 S , 从严格意义上讲, 应当用[11, 12]所述本征函数方法决定; 从近似意义上讲应当用 Котельников 抽样定理决定。时间自由度和空间自由度不能

Table 2 The values I/t for various systems

Size of object	transvers magnification image (10mm)	Velocity of object											
		10km/sec			100 m/sec			1m/sec					
		velocity of image	frequency of taking a picture P			Velocity of image	frequency of taking a picture P			Velocity of image	frequency of taking a picture P		
			displacement Δl				displacement Δl				displacement Δl		
	10 μ m	100 μ m	1mm		10 μ m	100 μ m	1mm		10 μ m	100 μ m	1mm		
10 μ m	1000 \times	10^7	10^{12} 5.4×10^{18}	10^{11} 1.05×10^{17}	10^{10} 1.14×10^{16}	10^6	10^{10} 5.4×10^{16}	10^9 1.05×10^{15}	10^8 1.14×10^{14}	10^3	10^8 5.4×10^{14}	10^7 1.05×10^{13}	10^6 1.14×10^{11}
100 μ m	100 \times	10^6	10^{11} 5.4×10^{17}	10^{10} 1.05×10^{16}	10^9 1.14×10^{14}	10^4	10^9 5.4×10^{15}	10^8 1.05×10^{14}	10^7 1.14×10^{13}	10^2	10^7 5.4×10^{13}	10^6 1.05×10^{12}	10^5 1.14×10^{10}
1 mm	10 \times	10^5	10^{10} 5.4×10^{16}	10^9 1.05×10^{15}	10^8 1.14×10^{13}	10^3	10^8 5.4×10^{14}	10^7 1.05×10^{13}	10^6 1.14×10^{11}	10	10^6 5.4×10^{12}	10^5 1.05×10^{11}	10^4 1.14×10^9
10 mm	1 \times	10^4	10^9 5.4×10^{15}	10^8 1.05×10^{14}	10^7 1.14×10^{12}	10^2	10^7 5.4×10^{13}	10^6 1.05×10^{12}	10^5 1.14×10^{10}	1	10^5 5.4×10^{11}	10^4 1.05×10^{10}	10^3 1.14×10^8
100 mm	$10^{-1} \times$	10^3	10^8 5.4×10^{14}	10^7 1.05×10^{13}	10^6 1.14×10^{11}	10	10^6 5.4×10^{12}	10^5 1.05×10^{11}	10^4 1.14×10^9	10^{-1}	10^4 5.4×10^{10}	10^3 1.05×10^9	10^2 1.14×10^7
1 m	$10^{-2} \times$	10^2	10^7 5.4×10^{13}	10^6 1.05×10^{12}	10^5 1.14×10^{10}	1	10^5 5.4×10^{11}	10^4 1.05×10^{10}	10^3 1.14×10^8	10^{-2}	10^3 5.4×10^9	10^2 1.05×10^8	10 1.14×10^6
10 m	$10^{-3} \times$	10	10^6 5.4×10^{12}	10^5 1.05×10^{11}	10^4 1.14×10^9	10^{-1}	10^4 5.4×10^{10}	10^3 1.05×10^9	10^2 1.14×10^7	10^{-3}	10^2 5.4×10^8	10 1.05×10^7	
100 mm	$10^{-4} \times$	1	10^5 5.4×10^{11}	10^4 1.05×10^{10}	10^3 1.14×10^8	10^{-2}	10^3 5.4×10^9	10^2 1.05×10^8	10 1.14×10^6	10^{-4}	10 5.4×10^7		
1 km	$10^{-5} \times$	10^{-1}	10^4 5.4×10^{10}	10^3 1.05×10^9	10^2 1.14×10^7	10^{-3}	10^2 5.4×10^8	10 1.05×10^7					
10 km	$10^{-6} \times$	10^{-2}	10^3 5.4×10^9	10^2 1.05×10^8	10 1.14×10^6	10^{-4}	10 5.4×10^7						
100km	$10^{-7} \times$	10^{-3}	10^2 5.4×10^8	10 1.05×10^7									
1000km	$10^{-8} \times$	10^{-4}	10 5.4×10^7										

混淆。高速摄影所记录的信息量与目标状态及高速摄影系统使用条件有关,由(25)式或(27)式计算。

参 考 文 献

- [1] С. В. Гуревич; *Эффективность и Чувствительность телевизионных систем*, (Энергия, Москва, 1964), с. 26.
- [2] С. В. Гуревич; *Передача и Обработка информации голографическими методами*, (Советское радио, Москва, 1978), с. 49.
- [3] Tao Chuncan; *ICO-B Conference Digest*, (Sapporo Educational and Cultural Center Sappor, 1984), 484.
- [4] H. Schardin; *Proceedings of the Sixth International Congress on High-Speed Photography*, (H. D. Tjeenk Willink & Zoon N. V, Haarlem, 1963), 1.
- [5] 李景镇; *«光学手册»*, (陕西省科学技术出版社, 西安, 1985), 951.
- [6] 龚祖同, 张耀明; *«高速摄影总论与间歇式高速摄影»*, (科学出版社, 北京, 1983), 31.
- [7] R. C. Jones; *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **51**, No. 11(Nov), 1159.
- [8] Leo Levi; *«Applied Optics»* (John Wiley & Sons, New York Chichester Brisbane Toronto, 1980), Vol. 12, 610.
- [9] C. N. Nelson; *Appl. Opt.*, 1977, 11, No. 1 (Jan), 87.
- [10] Leo Levi; *J. Opt. Soc. Am.*, 1958, **48**, No. 1 (Jan), 9.
- [11] G. T. Di. Francia; *J. Opt. Soc. Am.*, 1969, **59**, No. 7 (Jul), 799.
- [12] Tao Chuncan; *Optica Acta*, 1983, **30**, No. 3 (Mar), 361.

The amount of information of high-speed photography system

TAO CHUNKAN

(Department of Optics, East China Institute of Technology, Nanjing)

(Received 25 February 1987; revised 5 May 1987)

Abstract

Based on the theory of optical information, the expression of the amount of information for high-speed photography system is obtained. It shows that the amount of information depends on the object, parameters of the system and its working condition.

Key words: amount of information; high-speed photography.