

医学仪器

(应用与设计)

(第四分册)

(美) 韦博思主编

西安交通大学医学电子工程教研室

医 学 仪 器

(应用与设计)

(第四分册)

主编 (美) 韦博思

翻 译 集 体

校 订 蒋大宗

江苏工业学院图书馆
藏书章

西安交通大学
医学电子工程教研室

一九八二年九月

第四分册 译者名单

第十一章：西安交大

付世崇 冯延生 胡允中 王素品

第十二章：西安医学院 付文

第十三章：第四军医大学 场春智

第十一章 医学成像系统

Melvin P. Siedband & Jan E. Holden

可以把拍照、X-射线、超声、热象、电视及其他成像系统都看作照像机。所有照像机的图像都要受到空间分辨率、幅度的尺度和噪声大小的限制。我们可以把照片图像放大到它呈现为明显的“颗粒”为止，颗粒的大小决定了照片的空间分辨率和噪声。X-射线各像的分辨率受到X-射线源焦点尺寸的限制，其噪声受到X-射线强度的限制。超声图像受到换能器的角分辨率及从伪信号和噪声中分辨出真正信号的能力的限制。热像受到光子平衡交换产生的噪声的限制。电视图像受到摄像管的电子存贮能力的限制。

虽然，所有的图像都是由各种各样的成像系统产生的。然而，研究图像时可以不考察产生各像的照像机。可以把这些照像机看作是把一幅图像从一个平面转换或映射到另一平面的装置。它包括一个孔阑，与原图像所有相元有关的信号都通过孔阑，形成最终图像。不论是电视、X-射线或者其他某些成像装置的摄像机，都可以用空间传递函数来描绘。首先要定义一些基本术语，然后再用这些术语来描述医学成像系统的特性。

11.1 图像的信息容量

简单地说，一幅图像的信息总容量，就是离散像素的数目与每一像素幅度级数目的乘积。因为像素一般不是量化，或者不能分割成整齐的方块，而且会彼此重叠，就需要某些专用的计算方法。噪声，不论是由照片粒度或电荷引起的，还是主要由量子（X-射线） γ 射线或光子）的数目限定的，都会限制信道的允许放大量。为了方便起见，我们取信道中幅度级的数目与测得的信噪比相同。信道的噪声指数是测得的信噪比与理论上的或最佳信噪比的比值。

分辨率

我们可以把图像看作是给定尺寸的具有一定空间分辨率的平面，分辨率用单位毫米里黑白线对（LP/mm）表示。定义空间分辨率时，认为物体及物体间的空间是相等的。如果要看清10孔/cm

或 $100 \text{ 孔}/\text{cm}^2$ 的铜网，必须要求系统能分辨 $1 \text{ lp}/\text{mm}$ 即 $2 \text{ 像素}/\text{mm}$ ，才能显示出每个网孔及铜线。每一个可以分辨的物体，在每个方向上至少要有有一个线对或二个像素，这样才可以分辨物体间的空间及物体的本身。

图 11.1 表示电视扫描系统中的一组圆形物体的图像。首要的问题就是要决定需要多大电视扫描行来分辨这些物体。假定电视扫描器由机械定向的光敏传感器构成，它一次扫描一行，接着扫描下一行，直到整个图像扫描完毕，呈现光栅为止。假定把光敏传感器的输出接到类似的光扫描投影机上，由于光束被光敏传感器的输出调制，这样就把光束描绘在照像软片上，重新产生原图像。

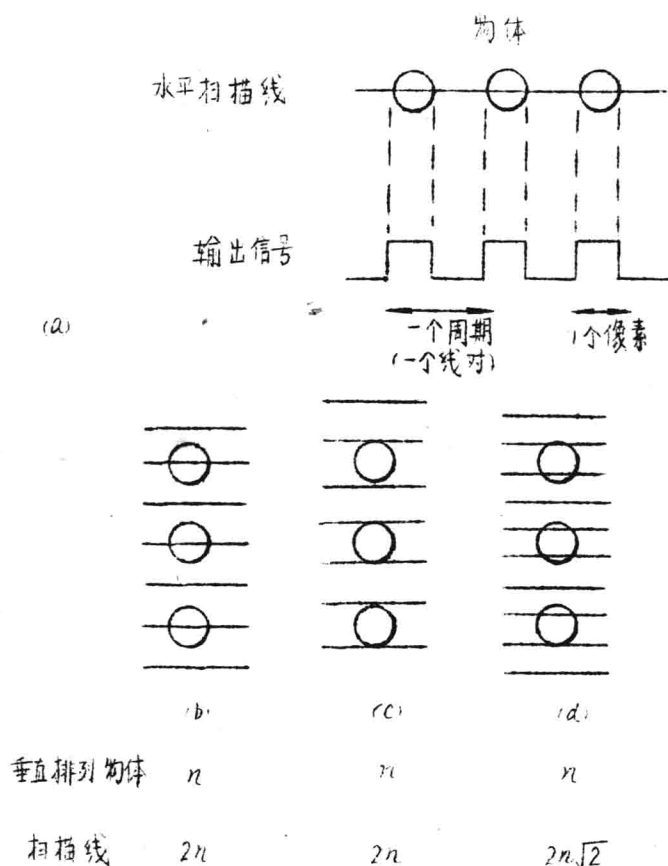


图 11.1

图 11. 1, 扫描线和圆形物体。(a) 每一个物体表示一个像素, 而输出信号的一个周期表示二个像素。(b) 几个垂直排列的物体必需 $2n$ 条扫描线才能分辨。(c) 如果物体在二条扫描线之间, $2n$ 条扫描线是不够的。(d) 需要 $2n\sqrt{2}$ 条扫描线才有足够的分辨率。

对扫描设备的基本要求是能够调准扫描线, 使它通过每一个圆形物体。若圆形物体是白色的, 则输出信号为正; 若圆形物体是黑色的, 则输出信号为负。对于有黑色间隔的一列亮物体, 信号的正半周表示物体, 而信号的负半周表示物体间的空间。总的说来, 每一个物体需要空间频率通带的一个整周期, 正半周代表物体本身, 而负半周代表物体的间隔。如果两个物体接触, 那么这种单线扫描就不能区分它们, 要确定物体之间是否有空间存在, 在两物体间, 必须再加一条扫描线。

然而, 在实际的系统中, 在扫描之前, 我们并不知道所要扫描的物体相对于扫描线的位置。对于一组 n 个垂直排列的物体, 必须有 $2n$ 条扫描线。如果我们假定, 这些物体以随机方式垂直放置, 则必须要更多条扫描线, 才能保证至少有一条扫描线通过每一物体, 及至少有一条扫描线通过物体间的空间的合理概率。

一般对于随机位置来说, 扫描线的数目, 要增加到相对于规则排列所要扫描线数目的 $\sqrt{2}$ 倍。若在正方形视野里, 有 n^2 个随机分布的物体, 而我们假定垂直方向上有 n 个物体, 则系统应该大约有 $2n\sqrt{2}$ 条扫描线, 才能获得检出每一个物体及其间隔的合理的概率。对于视野里的 n^2 个物体来说, 每条扫描线至少要求 n 个周期的通带, 才能分辨这些物体。因此, 每幅图像的总通带为 $2n^2\sqrt{2}$ 个周期。

在实际的电视系统中, 必须考虑另外附加的时间因素, 即在摄像管和显像管里, 每一次水平扫描及每一次垂直扫描之后, 电子束在磁力作用下回到起始点位置的时间。这种系统的递程消隐时间 (略

长于回扫时间)约为行扫描时间的18%。典型的525行美国标准电视系统约有480条可见的扫描线,垂直分辨率大约相当或略高于180个可数的物体。为了减少图像闪烁,并使图像相对于60赫电网干扰稳定,每个525行1/30秒的帧图像由隔行扫描的262½/22行1/60秒的二分场组成。回扫和逆程消隐时间约占每场的22行,即一帧时间的8%。因为多数电视的幅型比为3/4,水平分辨率刚好为240个可数物体。因此,配在15cm X-射线图像增强器上的电视电路,应该能够分辨12网孔/cm。因为,这就相当于在15cm的增强管视野上约有180个网孔(如果旋转一下网,使它正对着电视系统的对角线方向,那么还可以看清略多些的网孔)。

既然每个物体和物体间的空间都表示信息,二者应给予同样的权。我们把图像平面上水平轴向及垂直轴向上等于半周带宽的区间定义为相元或像素。把相元或像素定义为图像中可分辨最小物体的尺寸,这并不是说,如果有一个小于像素的物体,就不能发现它。例如,若系统的像素尺寸为0.5mm,我们观察0.1mm的钨丝模型时,看到的只是0.5mm大小的低对比度的物体,而不是0.1mm大小的高对比度的物体。

电视系统的高带宽 Δf 由下式决定:

$$\Delta f = \frac{n_h n_v \sqrt{2}}{F_h F_v T} \quad (11.1)$$

其中 n_h 为水平线上物体的最大数目。

n_v 为垂直线上物体的最大数目。

F_h 为图片水平扫描时间所占的百分比(1.0减去消隐时间所占的百分比)。

F_v 为图片垂直扫描时间所占的百分比。

T 为帧扫描总时间。

例11.1 标准美国闭路电视系统在水平方向上有240个物

体，垂直方向上有180个物体， $F_h = 0.82$ ， $F_v = 0.92$ ， $T = 1/30$ 秒 试计算带宽：

解答：

$$\Delta f = \frac{(240)(180)(2)(2)^{1/2}}{(0.82)(0.92)(1/30)}$$

$$= 4.85 \text{ MHz}$$

光眼的“复眼”由分立探测器组成而成。如果假定每个眼的直径为 $800 \mu\text{m}$ ，并由排列在球面上的60个探测器构成（总数约为3000），我们就发现一些有趣的事情。对于望远镜的极限，瑞利准则（Rayleigh Criterion）为：

$$\theta = \frac{1.22 \lambda}{d} \quad (11.2)$$

其中， θ 为刚能分辨两物体的角度。

λ 为光的平均波长。

d 为透镜的直径。

对于 $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$ 的光线，“复眼”的每一个探测器对应的角度：

$$\theta = \frac{(1.22)(0.6)(60)}{(800)}$$

$$= 0.055 \text{ 弧度或 } 3.16^\circ \quad (11.3)$$

复眼就复盖了整个半平面，各探测器元件间还有些重叠。

有一些电视图像检测器，它利用大规模集成电路去选择一个光敏二极管矩阵（譬如说 512×512 ）的输出。每个二极管结在扫描过程中充电，光的作用是让这个结部分放电，扫描的作用是把每个检测结的剩余电荷传递到检测器的存贮部分。就象在移位寄存器那样，电荷在检测器间传递，最后到达母线，并且加放大。分辨率

的限制与电视扫描的情况相似(必须用固定扫描线检测随机分布的物体)。因此, 512×512 的检测器矩阵就能够分辨 $512/2\sqrt{2} \times 512/2\sqrt{2}$ 或 181×181 个线对。

两种类型的探测器, 复眼和电荷耦合器件—CCD型电视检测器, 都把每一个单元当作独立的探测器, 把视野中的每一像素映射到探测器的相应单元上。

当图像敏感元件或视网膜是由探测器组成时, 其分辨率的限制是明显的。象软片、电视摄像管的电荷存贮表面、静电复印的基板, 以及发光的荧光屏这一类连续平面, 其分辨率也是有限制的。当探测器具有一定厚度时, 如荧光屏, 图像是在整个检测器上形成, 而仅在一个平面上来观察。光线在屏幕内散射, 而该屏幕具有扩散点物体图像的效应。对于厚的扩散性探测器, 刚刚能够分辨的两个物体的中心距离约为屏幕厚度的三倍。藉助漆加染料或光吸收剂可以减少光的横向扩散。例如, 利用黑底屏幕的电视显像管可以减少这种影响。

利用电子束扫描的电视摄像管, 它的空间分辨率受到电子存贮表面的厚度和电子束尺寸的限制。如果存贮层很薄, 分辨率就会改善, 单位面积的电荷也会增加; 然而必然增大束电流。电子排斥(空间电荷)作用加粗了电子束。提高分辨率的一种方法就是增大存贮层的面积。在相邻水平线间的电子束的扫描间隔大小, 要恰好使这些线有足够的重迭, 使表面积下均匀的电荷。因为电子束的散布几乎是高斯分布, 其间隔的限制和光学系统中的瑞利限制相似。

光学系统受到透镜衍射的限制, 并且也受到其他因素, 诸如在软片、胶、塑料基底以及透镜中多次反射的限制。胶中要有清晕作用(防扩散作用)的物质, 基底常常含有染料以减少光线的横向传递。

图像噪声

所有图像都受到空间分辨率的限制。如果我们打算把一幅图像分

得愈来愈小，就会发现图像受到一些最小相元的限制，或者说，透镜或扫描孔阑影响我们在图像中能够分辨最小相元。进而，在最小相元中，我们只能说图像是有还是无。这种有或无的准则，当然可以应用在考虑软片上银粒的情况。同样，它还适用于轰击阴极射线管荧光粉的电子束的情况，这种电子束不是连续的，而是由离散电子组成。荧光粉的微粒大小和被照射的概率也都在变化。对于尺寸较大的相元来说，我们可以认为，图像的灰度级或幅度级可以用数字定义，也就是说，图像可以用在更小相元上有无状态的数字来表示。

在多组的 q 次试验测量中，如果在每一组测量中，某一类型事件出现的概率为 p ，那么这类事件出现的平均次数即为 $m = p q$ 。例如，我们在 q 秒钟内，观察落在一定区域内随机分布的雨滴，若每秒观察到一个雨滴的概率为 p ，则 m 就是在几次观察中，在每 q 秒钟里看到雨滴的平均数。在平均值为 m 的测量中，任何特定滴数 K 的相对概率，可以由 Poisson 概率密度分布给出：

$$P(K; m) = \frac{e^{-m} m^K}{K!} \quad (11.4)$$

可以证实，该分布的平均值 m 确实为 m 。

$$\sum_{k=0}^{\infty} k P(K; m) = m \quad (11.5)$$

当然， K 从零到无穷大， $P(K; m)$ 的总和为 1，这种分布的方差也等于 m 。

$$\sigma^2 = \sum_{k=0}^{\infty} (K-m)^2 p(K; m) = m \quad (11.6)$$

因此，在平均值 m 附近波动的有效值正好是 $\sqrt{m}$ 。如果我们来考察多次测量结果，其平均值为 100 个事件，我们会发现正好为 100 个事件的很少，实际上，它们相对于平均值起伏，其标准误差为

10 个事件。

降落在指定面积上的雨滴，以及击中检测器象素上的 x -线光子，具有相同的统计特性。即使雨滴的平均值为 $100/\text{单位面积}$ ，而正好为 100 的概率仅为 0.040 。如果，我们设计一台扫描伏特计，对于 N 个事件，它的读数为 N 伏特。用扫描伏特计对某个象素的输出采样，我们就会发现，这里会存在一个有效值为 $\sqrt{N}$ 伏特的起伏，见图 11.2。

现在我们从稳态信号 N 变到调制信号 $N(1 \pm \bar{M})$ ，其中 $0 \leq \bar{M} \leq 1$ 为调制度， $N\bar{M}$ 表示信号 S 的信息内容的增量。在 $\bar{M}$ 最大时，信号最大，因此最大信噪比等于 $N/\sqrt{N} = \sqrt{N}$ 。于是，对于每秒每个象素的时间平均值为 100 个事件来说，信噪比的最大值为 10 。如果单元的线尺寸加倍，面积就乘 4 。对于相同的时间周期，每个较大象素的时间平均值为 400 个事件来说，信噪比的最大值为 20 。与此相类似，如果仅仅把原来单元的积分时间，从 1 秒变到 4 秒，那末单位象素也有检测 400 个事件的概率， SNR 的最大值也为 20 。对于时间平均值相同的纯随机信号，时间积分或空间积分具有同样的效果。换句话说，降低一幅图像的分辨率（增大象素的面积）。就可以提高图像的信噪比；或者对于相同的噪声电平来说，就可以降低对事件数目的要求。对于 $\bar{M} \neq 1$ 的情况，信号为 MN ，而噪声电平仍为 $\sqrt{N}$ ，因此信噪比为 $\bar{M}\sqrt{N}$ 。

在噪声强的条件下，要检测出低对比度的信号，则要求相当高的信噪比。参考图 11.3，图中的事件相当于 γ 光子，后者表现为在一幅图像上的计数。我们提出一个问题：“单位象素的光子数随机超过 $N + J\sqrt{N}$ 的概率是什么？”（其中标准差为 J ）。

我们发现（参考标准差值的积分表）：在 $J=1$ 时，有 16% 的像素超出界限； $J=4$ 时，有 0.003% 的像素超出界限。如果，我们考虑典型电视摄像机的视野，譬如说具有 180×240 个可数物体，或 $360 \times 480 = 1.7 \times 10^5$ 个像素，这时即使对于 $J=4$ 来说，每一电视图像帧还有 5 个象素随机超出界限。换句话说，为了在“虚警率”（false alarms）或随机超

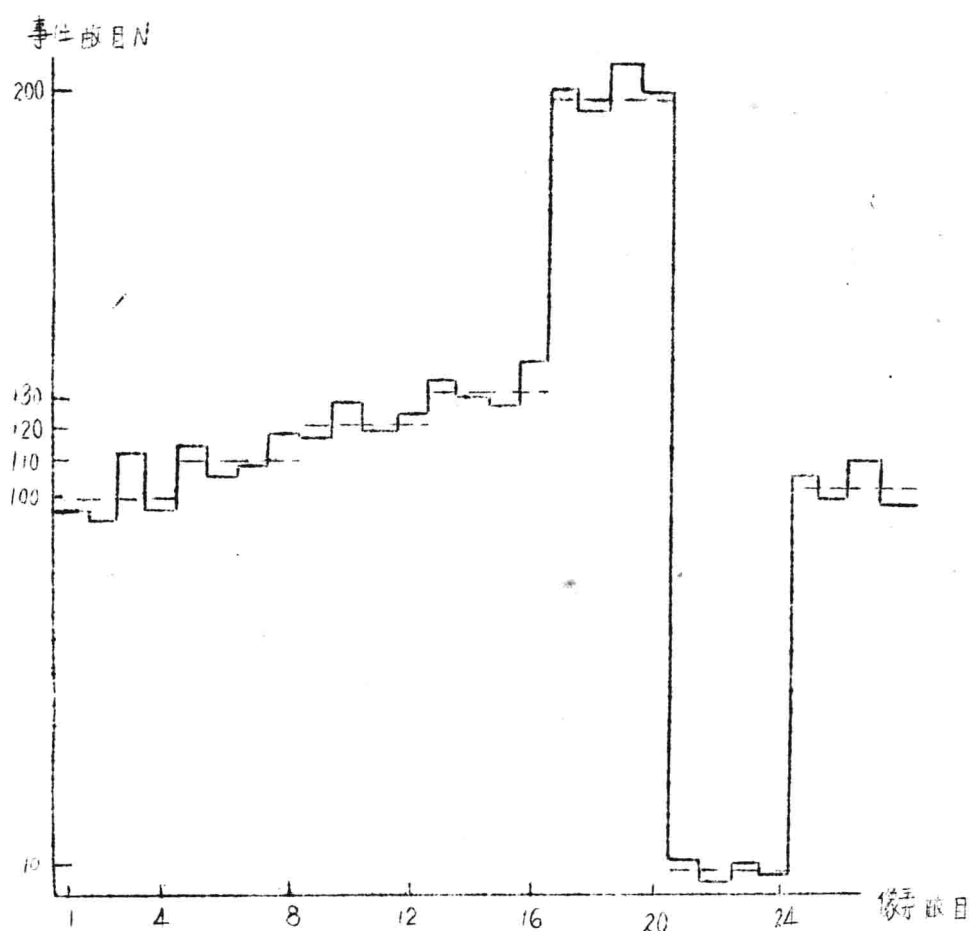


图 11.2, 一系列象素中每个象素的事件数目 N 。象素 1—4 表示平均值为 100 个事件, 其平均波动为 10 个事件, 象素 5—8 表示每个象素的平均值增加了 10 个事件。注意, 尽管象素 6 和 7 平均的数目增加了, 但象素 3 比象素 6 或 7 拥有更多的事件。随着平均增量增大, 在象素 9—16 中模棱两可的或然性较小, 即信噪比增大了。象素 9—16 表示, 原来平均值为单位象素为 100 个事件的信号, 用 8 个象素为周期的方波调制, 并且调制度 M 接近于 1。从图上明显看出 M 的最大值为 1。

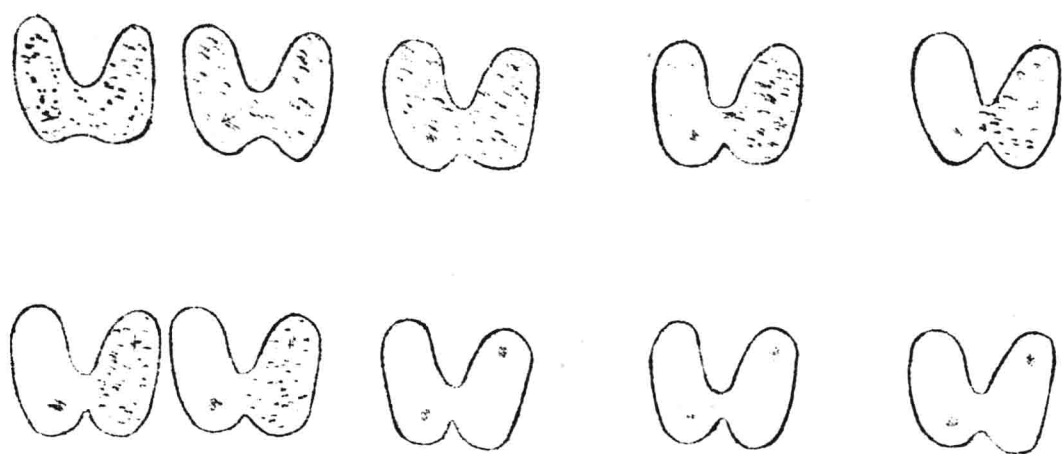


图 11.3. 对某个甲状腺模型的一系列 γ 照像的像片，每幅照片的计数数目增大一倍，计数的数目从 1563 到 80000。为防止在计数数目增大时曝光过度，相应地缩小一步成像摄像机的光圈。

过数小于 5 的条件下，能够检测出信号的存在，则要求对 N 的调制度，必须大于使产生信噪比 $(M/\sqrt{N})$ 大于 4 所对应的值。

如果，我们把 c 定义为上述系数 M 的对比度，所需的光子数至少不小于 bJ^2/c^2 ，其中 b 为像素的总数， J 至少不小于 4，理由如前所述。如果 d 是像素的线尺寸， A 为视野的面积，则所需光子的总数等于 $AJ^2/(d^2c^2)$ 。对于由颗粒限制的视野，光子数目较准确的估计值为 $N=25A/(d^2c^2)$ （假定 $J=5$ 时）。然而，在低对比度又是低对比度信号的情况下，由于电视扫描线和荧光粉颗粒性以及其他因素的影响，实际上，这一数目必须加大。数字大约加倍为 $50A/(d^2c^2)$ 。如果我们假定，在分辨率的极限时，要有 5% 的绝对最小对比度，这时检测所需的光子数为：

$$N = A \left[\frac{7.2}{d(c-0.05)} \right]^2 \quad (11.7)$$

尽管 (11.7) 式是在单个像素的线尺寸为 d 的情况下导

出的，但是，可以把它推广到 d 为任何尺寸的物体。那就是说，当物体的尺寸增加时，对于相同检测概率降低了所需的对比度。

11.2 调制传递函数

调制传递函数 $M T F$ 是某一部件或整个成像系统的空间频率响应的另一种表示法。可以清楚地看到，用最小分辨单元来定义某系统的最高分辨率，并不能充分表明该系统的性能。因为，某一系统可以分辨高对比度 2 网孔/mm 的铜网，而难于分辨病人的膀胱，因为后者图像的对比度较低。 $M T F$ 是按照测出的作为空间频率函数的幅度响应画出来的，它假定零频率点的响应为 100%，并忽略其相移。如图 11.4，假定，通过第一个反相点时幅度为零。把传递图像的各部件的 $M T F$ 在每一空间频率上逐点相乘，就得整个系统的 $M T F$ 。

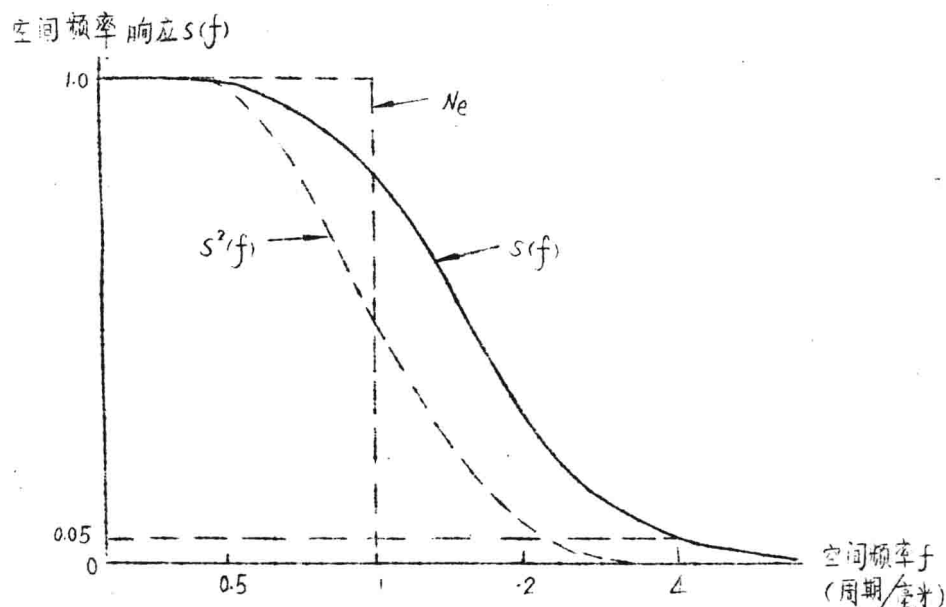


图 11.4 典型 X-射线系统的调制传递函数 $S(f)$ 。把 $S(f)$ 平方并积分，就得到噪声等效噪声带宽 N_e 。图中表明，在对比度为 0.05 时，最高分辨率为 4 周/mm。横坐标表示每毫米周期数，即每毫米线对数。

为了测量 MTF，我们用一个正弦形变化的试件调制输入信号，以复盖从零到最大频率的频带。由于正弦形试件难以制造，所以通常的做法是利用矩形条状模型。在 X-射线系统中，条状模型通常由铅或钨合金制成，组成一系列条块和间隔，从低频开始逐渐增加频率（即缩小间隔）。把这种试件放在 X-射线图像探测器的前面加以照射。藉助光学系统的各种透镜，可使类似的摄影块状模型成像。因此，可以单独用光学方法来试验。探测器由显微镜组成，在显微镜的焦平面上有一狭隙缝，透镜的后面装有光电倍增管。光电管的输出接到记录仪上，这就记下作为频率函数的方波幅度。

一个方波函数可以用 Fourier 级数展开式中的正弦分量来分析。方波的 Fourier 级数展开式矩阵的反演，就可以给出用方波幅度来表达的正弦波幅度的方程式。在下列公式中， $S(f)$ 表示正弦波在频率 f 时的幅度，这是把在 f 、 $3f$ 、 $5f$ 等处方波幅度的测量值 $M(f)$ 代入得到的：

$$S(f) = \frac{4}{\pi} \left[M(f) - \frac{M(3f)}{3} + \frac{M(5f)}{5} - \frac{M(7f)}{7} + \dots \right]$$

(11.8)

这样，就可能把测得的方波数据，变成欲求的正弦波数据。尚有求得 MTF 的其他方法。例如观测脉冲或点扩布函数，或者观测单个细线的响应，以决定线扩布函数。

一旦得到一个部件或系统的 MTF，我们就可以从 MTF 得出一些有用的数值。通常，我们假定在对比度为 5% 时，测得的分辨率就是部件或系统的最高分辨率。在 X-射线系统中，在 0.1 线对/mm 时，MTF 的幅值定为低频对比度。信号的幅度与每一像素的事件数有关。通过对等效带宽或对单位带宽来积分，我们能够得到相元信息容量的量度。我们知道 SNR 与 $\sqrt{N}$ 有关，其中 N 为单位像素的事件数目。为了得到作为幅度函数的各种系统的视觉当量的量度，我们必须得到有效值当量。

11.3 噪声等效带宽

考察信息容量的另一途径，就是注意到 N 与面积有关，以及幅度响应的平方正比于包含在给定线尺寸的某一面积内的事件的数目。在空间频率 f 上，噪声等效带宽就是一个等效系统的带宽，这一等效系统，从零频到 N_e 它的幅度响应为 100%，超过 N_e 则为零，并和一个其幅度响应为空间频率的函数（即 $S(f)=MTF$ ）的系统相当。对 MTF 幅度平方、积分，就可以得到 N_e 。

$$N_e = \int_0^{\infty} S^2(f) df$$

这就好象把 N_e 定义为，分辨率为 N_e 的模拟光电阴极检测器（ N_e 像素/cm），它和一个连续检测器（ N_e 是从它的 MTF 导出的）的 SNR 特性相同。从一系统的噪声特性的观点来看， N_e 是等效空间分辨率的极好的量度。

可以从单个部件的 N_{e_s} 来估计系统的 N_e 。

$$\frac{1}{N_e} = \left[\left(\frac{1}{N_{e1}} \right)^2 + \left(\frac{1}{N_{e2}} \right)^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (11.10)$$

N_e 的概念就成为一个用简单数字表示空间频率响应的极重要的方法， N_e 是一种描述系统的有效和有实际意义的数值。应该用 N_e 来代替极限分辨率。

眼睛是一种受噪声限制的仪器，因为低幅度函数（例如在对比度为 5% 时出现的极限分辨率）在积分时取平方值，它们对系统的总特性影响很小，而对比度适中的真实物体的感受能力是主要的。如果，把系统的各个部件的 MTF 画在同一个平面上（最好画在检测器平面上），系统的设计者就能看到各个部件对系统分辨率的贡献。

11.4 照像

照像的一般过程是以软片感光乳剂上的溴化银晶体的点阵特性为基础的。光子从溴原子中溅射出电子，一部分电子被银原子俘获并被中和，银原子就从点阵上摆脱束缚，形成金属银原子。对于一个单独的银原子，还会由于热运动丢失中和电子，而被重新束缚在点阵上。譬如说，如果有5个或相邻更多的银原子几乎同时摆脱束缚，那末，它们保持自由金属状态的概率很高。化学处理（显影剂）使颗粒中相邻的银离子，聚集在金属银原子的周围，形成约为 10^3 金属银原子的颗粒，而剩下的溴化银被溶液（定影剂）带走。

我们假定，某感光点需要25个光子产生最初5个银原子，并给出一个能够显影、且与感光乳胶或显影效应无关的单个颗粒。这就是说，对于给定的感光乳胶和显影剂类型，虽然单位面积的颗粒数及颗粒大小都会变化，但是每个颗粒所需的光子总数是一定的。因此，单位面积的微粒软片所需的光子数比粗粒软片要多些。实际上，产生一个可显影的颗粒所需的光子数也不是常量，而是在某平均值上下以统计规律分布的。采用简单的统计平均方法表明，得出的结果基本上还是真实的。

溴释放电子所需的能量为 2.4eV ，相应于波长为 520nm （图2.21）——即兰色或波长更短的光。为了获得对较长波长光敏感的软片，把各种发射电子的染料吸附在紧靠着银原子的颗粒上，弱光子在染料中生成一个电子，就被银原子俘获。也可以把吸收光的染料混入感光乳胶或放在感光乳胶的前面，以降低对较短波长光的灵敏度。这样，就有可能制造可变灵敏度（以及颗粒大小）和光谱相应的感光乳胶；正色片（兰和绿）、全色片（兰、绿和红）或者红外片（红和红外）。

在化学显影前，软片上形成的图纹叫做潜影。由于缓慢的热运动，有些金属原子仍有可能被重新束缚在点阵上，这叫做潜影消失。解除大约最初5个相邻的银原子在适宜时间内的束缚，是很重要的。各种软片都有一定曝光时间范围，使得某一定光强度和时间的乘积