

相干光成像问题

前言

假若要评论一下用相干光（或部分相干光）成象的问题，你很可能会有下面反应中的一种，

- (1) 像瘟疫一样避开它，
- (2) 确保你的系统是对非相干光设计的，
- (3) 不睬它，它就不存在了。

偏巧因为种种理由这些回答都不令人满意。现在相干光学系统几乎以全息成象，相干光学处理，激光读出，记录和显示装置，相干光存贮等各种形式存在。确实有另外一些成象情形，这时用相干光照明物体有明显的好处，这不是因为要求用相干光而是因为希望有窄的谱宽和准直性等附带性质。这些情形还包括某些高速摄影的应用，在强背景光下的正面相干照明以及光敏材料的相干照明。

在说明了需要使用相干物体照明之后，下面显然就是要了解这种成象的性质以便能进行接受系统的设计。关于这个课题已有相当多的文献，这些文献描述一般原理也说明主要的效应，同时把结果与用同一成象系统对同一物体的最普通的非相干成象作了比较（最近的评述见1969年汤姆逊的文章）。

本文将简略地概括一下把普通光学系统用于相干成象时应注意的主要效应，并且说明一些不利之处和可能的益处。但是大多数这种评述涉及的都是用普通光学系统、即那些本质上是对非相干照明物体所设计的系统来成象的。最近几年两个工作小组已经相互

独立地叙述了，对用于相干照明物体成象的透镜性能的要求的问题。这里将概括地说明这些工作的结果。（格鲁伯1971，汤姆逊1972，格鲁伯和汤姆逊1974；史密斯1971，1972，1973）

相干光成象

考虑有一个成象系统（比如说单透镜）在象距 z_2 处对一给定物体成一象。如果这个物体被相干光照明而且它有一个振幅透过率 $\psi_{ob}(x)$ ，其中 x 是物空间的坐标，那么象上的振幅分布 $\psi_{im}(\xi)$ 由下式给出

$$\psi_{im}(\xi) = \exp\left(\frac{ik\xi^2}{2z_2}\right) \int \psi_{ob}(x) \exp\left(\frac{ikx^2}{2z_1}\right) K\left(\frac{\xi}{z_2} + \frac{x}{z_1}\right) dx \quad \dots\dots(1)$$

其中 ξ 是象空间的坐标， z_1 是物距， $k = 2\pi/\lambda$ ，函数 $K(\xi/z_2 + x/z_1)$ 是成象系统的振幅脉冲响应。所以被探测到的象是

$$I_{im}(\xi) = \psi_{im}(\xi) \psi_{im}^*(\xi)$$

$$I_{im}(\xi) = \left| \int \psi_{ob}(x) \exp(ikx^2/2z_1) K\left(\frac{\xi}{z_2} + \frac{x}{z_1}\right) dx \right|^2 \quad \dots\dots(2)$$

如果用同一成象系统对非相干照明物体成象，那么物强度分布是 $I_{ob}(x)$ 而且象强度由普通的卷积积分确定

$$I_{im}(\xi) = \int I_{ob}(x) S\left(\frac{\xi}{z_2} + \frac{x}{z_1}\right) dx \quad \dots\dots(3)$$

其中 $S(\xi/z_2 + x/z_1)$ 是强度脉冲响应，它和振幅脉冲响应的关系由下式给出

$$S\left(\frac{\xi}{z_2} + \frac{x}{z_1}\right) = K\left(\frac{\xi}{z_2} + \frac{x}{z_1}\right) K^*\left(\frac{\xi}{z_2} + \frac{x}{z_1}\right)$$

显然方程(2)和(3)是不同的,因而象强度分布也是不同的。人们喜欢用非相干系统,它很简单,因为它对强度来说是线性的。相干系统对振幅是线性的而对强度来说则是非线性的。这个差别造成了一些众所周知的效应。一个简单而说明问题的例子是两个点物体的象(格鲁伯和汤姆逊1967)。图1

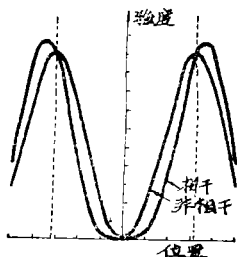


图1 比较了当两个点是(a)彼此相干的,(b)非相干的,所产生的象强度分布。垂直线说明两点的真实位置(格鲁伯和汤姆逊1967以后)。

很好地说明了这个结果,并且比较了当两个点是(a)彼此相干的,(b)非相干的,所产生的象强度分布,竖直虚线是象空间的两个点物体的真实位置。在这两种成像情形中都有很好的分辨率,但相干情形时强度分布的峰值位置显然不对。如果要对物体的位置进行测量,这种情况就很严重。幸亏这个误差不是固定的,而是随着两个点的实际间隔以及两个点之间的相干度变化的。图2所画的曲

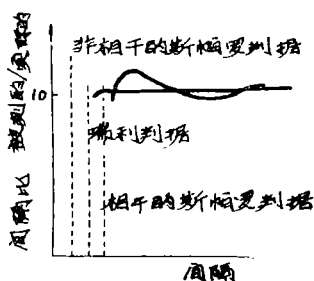


图2 作为两物体点间隔函数的间隔比(被测间隔对实际间隔的比)。直线是非相干曲线,而另外一条线是相干曲线(根据格鲁伯和汤姆逊1967修改的)。

线很好地概括了这点。测量的和真实间隔之比是作为真实间隔的函数画出来的。理想地,由于两个峰被很好地分辨,这个比值应当是1,而且当间隔增加时仍然是1。这对于非相干情形是对的。图中标出按瑞利标准的间隔的位置以及非相干和相干情形的斯帕罗标准的间隔位置。对于相干情形,我们看到这个比值是在1的上下摆动的。要指出的是,对于某些间隔这个比值是1,即相干情形给出了正确的间隔。这些结果是对圆对称的衍射极限成象系统——在光学系统设计时总是力争做到这点——来说的。在相干成象时的这些效应是由衍射极限系统的振幅脉冲响应的性质造成的。这个脉冲响应的某些区域有负值,它造成了峰值位置的移动,因为象强度由方程2式给出。

用相干光照明将直边成象时有一个非常重要的效应。图3说明在相干和非相干照明

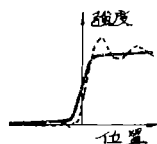


图3 比较在相干和非相干照明时被很好分辨一个狭缝的象强度分布。

两种情形中一个狭缝的象强度分布。物体仍然可以很好分辨。要注意两个主要效应;相干成象的象强度有起伏(因为它是由和电气线路的减幅绕动(ringing)相同的基本原因产生的,所以这个效应常称为绕动(ringing));第二个效应是直边的表现位置移动,即如果要作测量的话也是很含糊的。值得指出的是,相干成象时直边实际上变得更锐(即有更陡的斜率),因而精度改善了。

在把系统用于传输时这些结果是特别重要的,而这些系统是本文的主要论题。在反射系统中相干成象所具有的斑点图样十分严重,而未解决的问题这里就不作探讨了。

相干象的记录

在比较特殊的情形下有可能采取忽略刚才讨论过的挠动和移动效应。当需要以相当高的分辨率作窄线条曝光时就会发生这种情形，此时用非相干光照明物体实际上是不可能的。然而慎重的使用相干照明可以获得很好的结果。图4说明了这点，直边象记录在

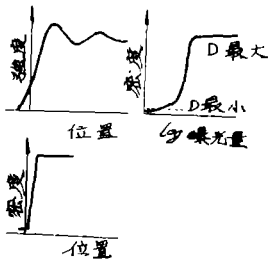


图4 记录在胶片上的相干图象强度分布的结果，陡的密度对Log曝光的曲线有效地抑制挠动效应。

有相当陡的响应曲线的胶片上。选择曝光量使获得的 D_{max} 等级相当于一个低于出现挠动的强度等级。于是记录之后所产生的密度截面表明确实没有什么挠动效应。这时，直边移动反而是有益的，因为它使线条稍稍变窄了。因此在一些微电路的应用中，看起来这倒是个想往采用的方法。于是毕竟有一些方法，如果你要忽略相干效应，就可以使它们不复存在。然而这决不是个普遍的解决办法。

相干效应的控制

在设计非相干系统时向来总是力图做到尽可能地使之接近衍射极限性能。对于非相干系统来说这是完全满意的也是最佳的解决办法。然而把它用于相干光成像时正是这个很好的衍射极限性能造成了那些问题，因为振幅脉冲响应的某些区域是负的。因此显然

希望要求，振幅脉冲响应是实的和正的。当然要注意到，在非相干情形强度脉冲响应总是实的和正的。两个工作小组几乎同时和独立地明确提出了这个思想（格鲁伯1971，汤姆逊1972；史密斯1971，1972）。

要达到这样一个条件就意味着，如果对振幅脉冲响应选择一个函数，那么光瞳函数也就被确定了，因为这两个函数是傅立叶变换对。所以有可能考虑取一个衍射极限透镜并切趾它的孔径。平时对非相干系统所做的切趾是慎重地改变其强度脉冲响应的形状。

三角形切趾

一个立即可以想到的振幅脉冲响应函数就是使振幅脉冲响应有和衍射极限系统的强度脉冲响应相同的函数形式，即在一维系统中这个振幅脉冲响应是一个 sinc^2 函数而在二维情形是一阶贝塞尔函数的平方除以其容量的平方。这要求一个三角形的切趾函数，图5

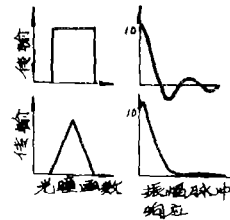


图5 衍射极限光瞳和用三角形切趾函数切趾的相一光瞳的振幅脉冲响应。

说明了这点；左边的图表示光瞳函数而右边表示相应的振幅脉冲响应。当然三角形切趾函数必须放在原来光瞳的透明孔径内。所产生的脉冲响应是实的和正的，而且要比没切趾透镜的脉冲响应宽些。这意味着降低分辨率，但这多半是没什么用的分辨率。

图6a—d说明对两个点的相干象使用这种切趾。所产生的强度是作为位置的函数画出来的；因为这个图样对垂直轴是对称的，所以只画出了整个分布的一半。在每种情形

注：图5上“传输”改为透过率。

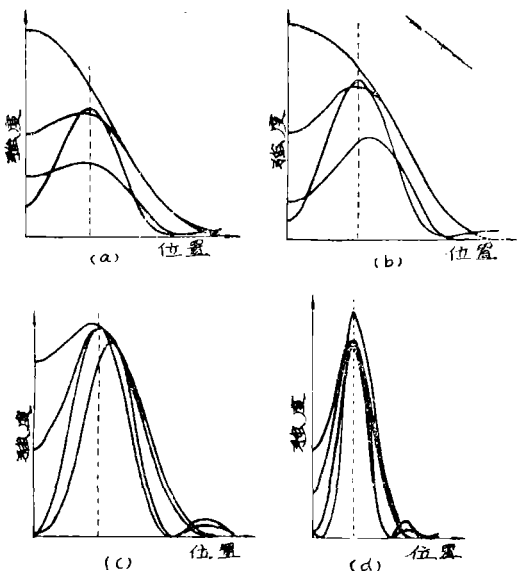


图6 比较了用相干光和非相干光照明、使用和不使用三角形切趾的两点物体的象强度断面图。A是非相干象，B是相干象，它们都是非切趾系统形成的，C和D是用切趾光瞳形成的非相干和相干象。

中，A是非相干象，B是相干象，它们都是非切趾系统形成的，C和D是用切趾光瞳形成的非相干和相干象。在图6a中曲线A表明有相当好的分辨率，曲线B和C表明刚能分辨而曲线D表明不能分辨。于是如所预期的那样，分辨率由于这个切趾而减小。当非切趾的脉冲响应宽度与两个点的间隔之比减小时，基本分辨率增加。在图6b中，A、B和C都表明有很好的分辨率，但在曲线C上峰值离开了它的正确位置；在相干切趾情形D中仍不能分辨。图6c表示的情况是所有曲线都有可接受的分辨率；两个非相干曲线给出的峰值在适当位置上，而相干结果曲线C有相当大的位移；相干成象的切趾对峰值位置来说给出一个较好的结果，尽管它因为峰的分辨相当低也有轻微的位移。最后在图6d中，所有曲线都有很好的分辨率，非切趾的相干结果有在正确位置的峰，这和图2所描绘的特殊情形相对应，切趾之后峰仍

在正确位置上。史密斯(1971)已经用相同的切趾来计算对直边象的影响，并说明这抑制了直边的绕动，如图7所示。

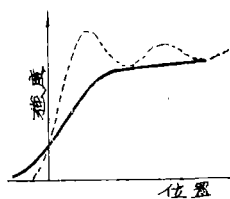


图7 三角形切趾对直边象的影响(史密斯1971之后)。

非线性效应

在直边相干成象时发生的两个效应是由完全不同的原因造成的。当振幅脉冲响应不是实的和正的时出现绕动，而直边移动则是非线性的结果，因而不能用切趾控制。用下面的例子很容易说明非线性效应。我们将选择一个简化了的系统(也是比较理想化的)，但论证是正确的而与脉冲响应的选择无关。图8左边(a—c)表示，一个强度分布为矩形

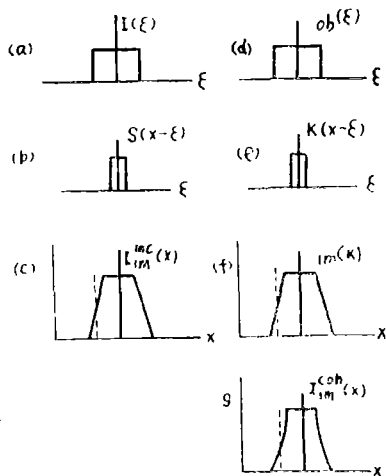


图8 说明由于相干成象过程的非线性而出现直边移动。(a)物体强度分布。(b)强度脉冲响应和(c)由a和d卷积形成的非相干象。(d)是物体的振幅(e)是振幅脉冲响应(f)是由d和e卷积形成的象振幅的分布。(g)最后的强度分布是 f^2 形成的相干象。

函数的物体被一个强度脉冲响应为矩形函数的系统成像。这个象强度由这两个函数的卷积形成，正如方程(3)式所指明的并表示在图(c)上；矩形物函数的实际直边位置是在最终象强度的半强度点处，并用虚线标出。为了比较，图的右半部表示相应的相干成像过程，如方程式(2)所阐明的那样。所考虑的物体没有与之相联系的相位，所以振幅脉冲响应也是一个矩形函数，具有同样条件的振幅脉冲响应是一个矩形函数。图(f)表示所产生的象振幅而矩形物函数的边的正确位置在半振幅点处。然而探测步骤要求的是最终振幅的平方，这就产生了图8(g)——边的移动现在是明显的。

低对比限度

在低对比限度时非线性效应会慢慢消失。这十分容易明白，图9说明了这点，这是一个低对比直边的相干象。要注意的是，现在挠动在两个边上都有，但移动已被消除。

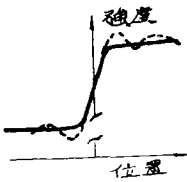


图9 与非相干象比较的低对比度直边的相干象(……)。

高斯切趾

一个满足所要求条件的振幅脉冲响应是一个高斯分布。于是要求对光瞳作高斯切趾。但是光瞳的范围总是有限的，因此高斯切趾函数被孔径所截断。格鲁伯(1971)、格鲁伯和汤姆逊(1974)已经比较详细地研究了高斯切趾的运用，这种切趾是有效的。图10说明两个点象的结果。最上面的曲线表示非

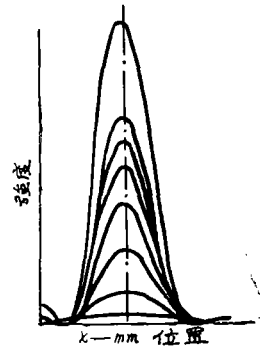
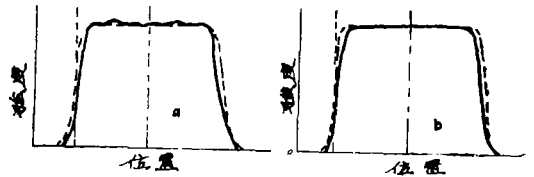


图10 说明两个点象的结果。(格鲁伯1971年 格鲁伯和汤姆逊1974年)

切趾光瞳所成的相干象；曲线簇表明当高斯切趾的半宽度与光瞳半宽度之比 C 从 0.8 减小到 0.2 时所造成的象强度分布。这个图当然是对原点对称的。要指出的是，对于 $C = 0.6$ 时峰恢复到其正确位置（竖直线标出这个点的正确位置）。

上面谈到的文章在研究这种切趾的同时也研究了狭缝的相干象。图11 a 和 b 表示具有不同 C 值的一个很好分辨的狭缝的两个象的结果。非相干和相干曲线被归一化到同一数值。这就掩盖了用这个和另一个振幅切



(a) $c=0.72$. (b) $c=0.5$. (格鲁伯1971, 格鲁伯和汤姆逊1974之后)。

图11 a和b表示具有不同 c 值的一个很好分辨的狭缝的两个象的结果。……非相干光照明，一相干光照明。

趾函数所发生的能量损失。然而挠动已被很好地抑制，但仍然有直边移动。

其它切趾

可以考虑其它切趾函数；1973年史密斯

提出一个切趾函数，它是一个余弦函数的自相关函数，其中余弦函数的宗量有 $t\pi/2$ 的限制。有趣的是帕伯利斯(1973)指出，这同一个函数可作为高分辨谱的估值所用的最小偏置窗口。图12说明在这些条件下的直边象(史密斯1973年)。

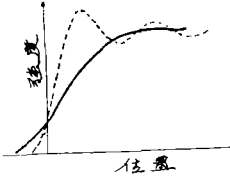


图12 一个有切趾函数的直边的象强分布。切趾函数是一个余弦函数的自相关函数，余弦函数的宗量有 $t\pi/2$ 的限制。

相位物体

在相干系统中物体相位效应的问题是非常重要的。这又多少取决于相位信息是重要的还是无关紧要的。相位对比显微镜的效果依赖于有一个合理的相干度。另外一些相位显微镜的新技术也依靠相干物体照明。在相干光照明时相位边缘能非常好地显现出来。如果相位边缘包含一个 $\frac{n\pi}{2}$ 的相位差，其中 n

是偶数，那么边缘的相干象被一暗线鲜明地标出界限。当边缘之间的相位差减小时那个暗线的对比降低，而且当相位差是 $m\pi/2$ 时，其中 m 是奇数，对比变成零(见汤姆逊1972年对这个效应的说明)。

对于两点的分辨率标准来说，这种系统有无限分辨率，只要两个点的相位是完全相反的。当然峰在不正确的位置上(见汤姆逊1969)。史密斯(1972年)已经用余弦函数的自相关的切趾处理了半透明的相位边缘。

结 论

把相干光学系统的设计考虑为一个特殊问题，显然是有一些优点的。需要考虑另外一些可能的切趾函数，而且复值切趾有可能是最佳的解决办法。在和 H. H. 霍普金斯的讨论中引出一个很重要的问题，即由于物体位置所造成的相位变化，相干系统是非常不稳定的。这个问题并没有得到充分地研究。

“SPIE PROCEEDINGS Vol 46 (Image Assessment & Specification) May 20—22 1974”

(遼小靖译)

(上接第4页)

切边是一个先进的工艺方法，同低熔点合金模具配套，则完全可以代替沿用多年的落料模和切边模，是一条中、小批生产革命化的生产准备路子。

2. 140WCO₂激光器可切1.5毫米厚钢板，240WCO₂激光器可切2.5毫米厚钢板。

考虑到空间曲线的斜率，最适宜光整切削厚度分别为1.2毫米和2.0毫米，这样有一

定的功率储备，就不会被工件曲率的变化或其他条件(焦距、吹氧、反射等)而影响。

3. 通过典型件在固定式切割机上的实践，我们感到配备活动导光管的切割机就更适于形状复杂的拉伸件切边，割孔……，其实现方法可用一台激光器实现固定式和活动式两个工位切割，中间加一个转换光学系统即可。