

关于分析具有闭合环状条纹的干涉图的实验与讨论

刘瑞祥

博池(K. G. Birch)

(英国国家物理实验室机械与光学计量部)

摘要: 在英国国家物理实验室机械与光学计量部所从事的标准镜头光学传递函数的测量,是靠计算由台曼—格林干涉仪所测得的光瞳函数的自相关来实现的。在实践中,多种多样的干涉图可用以提供充分的信息来求得波像差的多项式表达式。但是以前所采用的条纹搜寻与条纹定级程序无法处理具有闭合环状条纹的干涉图。本文将讨论这些困难之所在并介绍新的处理方法,特别是如何对这种干涉图进行条纹搜寻与定级问题。这些方法的有效性将由几个分析过的带有闭合环状条纹的干涉图的例子来加以证明。

引 言

一组光学传递函数(OTF)标准镜头在NPL加工出来以校准那些采用扫描法的OTF仪器^[1]。早先的一篇文章描述过利用与TV相连的台曼—格林干涉仪测量波像差^[2],并利用镜头光瞳函数的自相关来计算OTF。然而,恰如在那篇文章中所指出的,如果想要使用一个自动的定级程序来给光瞳内所有的条纹采样点定级,那就要求被测干涉图的条纹分布与形状满足一些必要的条件。图1(a)给出满足这些条件的干涉图形的一个例子。应当注意到,图1(b)—1(d)所示的干涉图形也经常出现在实际工作中。它们都含有环状干涉条纹,这是由与图1(a)的情况有不同的离焦与倾斜而产生的。

我们的经验是,这种干涉图不仅出现在OTF镜头的研究中,还出现在实际干涉术的其它方面。因此希望这种干涉图能够被解析。

实验上发现,一些新的问题会随环状条纹的存在而产生。本文将讨论这种环状干涉条纹的处理,粗略地叙述如何处理强度分布以搜寻条纹峰值,着重描述一个新的对所探测到的条纹重新定级的方法。

强度分布与搜寻方法

可以从实验上证明,带有环状条纹的干涉图的强度分布与无环状条纹情况相比较,有三点主要差别。第一,沿着每条测量弦,各条纹上的采样点数可能显著变化,即其中的某些条纹含有较其它多得多的采样点。第二,条纹的对比度不再保持在整个光瞳上均匀。由图2可见,条纹密集部份的对比度较其它为低。第三,当条纹近于平行于采样弦时,在很大一段距离内强度变化缓慢。这时,噪音的存在对于条纹探测过程是一个极大的妨碍。

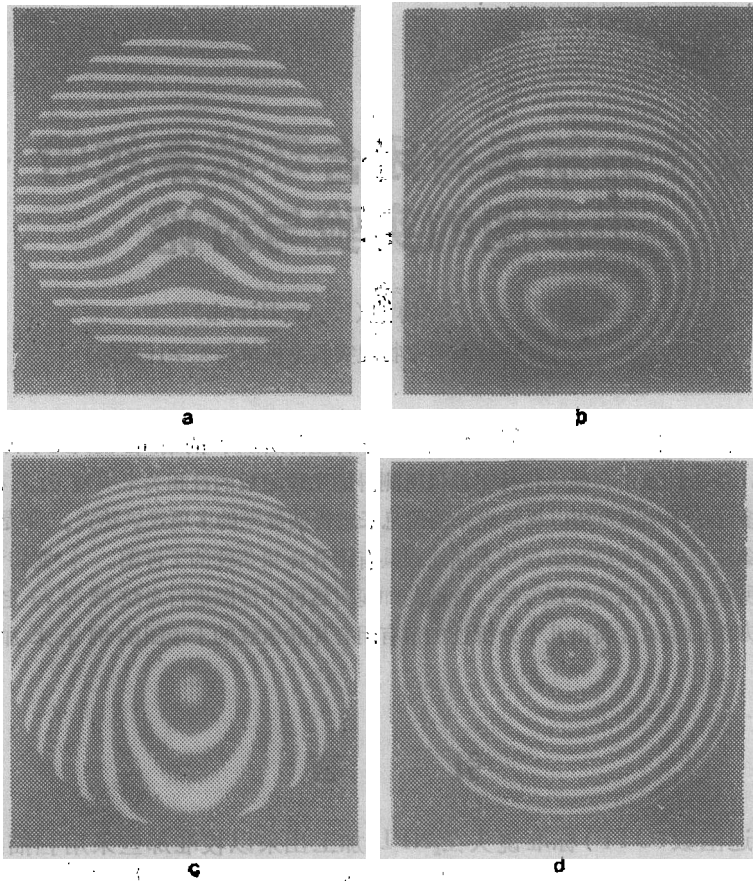


图1 利用干涉仪中不同的离焦与倾斜所得到的三片型标准镜头的轴上干涉图的几种典型形状

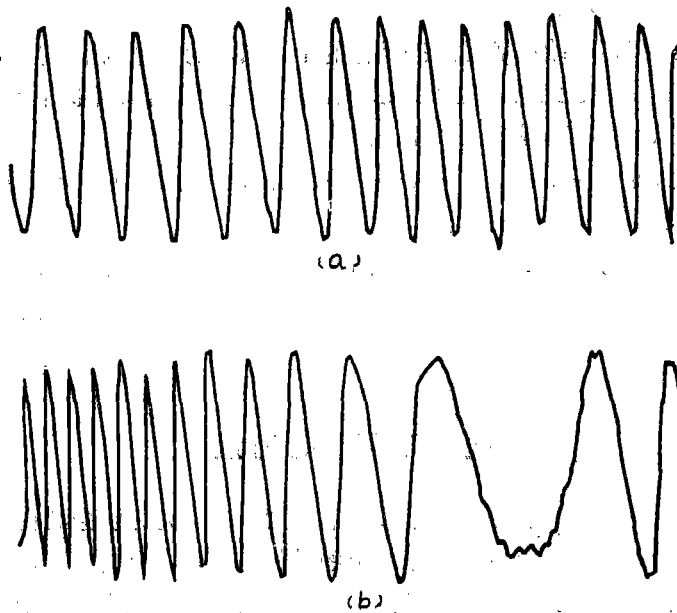


图2 干涉图中(a)无环形条纹与(b)有环形条纹情况下,分别对应于图1a与1b中同一测量弦上强度分布的比较

正是由于这种变化，几个问题就会出现在搜寻过程中，譬如条纹的漏失，伪极大，甚至对一条条纹会找到多个极大值等。

为了克服这些问题，必须使那些影响条纹对比的仪器条件最佳化并改写由测得的数据进行条纹探测的相关软件部份。

使条纹有尽可能好的对比度，这是重要的。关于这个问题，通常认为三个因素可能导致条纹对比度的下降。首先是干涉仪的光源尺寸，亦即星孔尺寸所确定的空间相干性。第二，将干涉图成像到电视摄像管上的中继成像系统的 OTF 本身的影响。第三，干涉仪双臂的光程长度不等。因此，算得并采用一个适当的星孔尺寸，仔细地选择与配置 TV 系统及相关的光学件，并精细地调整使干涉仪的两臂光程等长，这些措施有可能使条纹的对比度达到最佳。然而，必须注意到，在条纹较密集部份其对比度的衰减不会因此而得到改善。

图 2 (b) 还表明在条纹间隔大的部份可能出现的一个问题。由于信号上有噪音，强度呈现为无规则分布。因此，要想避免伪极大，必须对此加以平滑。从实验上发现，利用把三个或五个相连的数据点的强度相加取平均的办法，可以较好地平滑这种噪音的影响。如果在第 K 点上的值为 $D[K]$ ，采用三点式或五点式平滑时，平滑后输入该点的值分别为

$$D'[K] = \{D[K-2] + D[K-1] + D[K] + D[K+1] + D[K+2]\} / 5 \quad (1)$$

或者

$$D'[K] = \{D[K-1] + D[K] + D[K+1]\} / 3 \quad (2)$$

图 3 表示平滑前后采样数据的比较。



图 3 平滑前 (连续线) 后 (断线) 采样数据的比较

与此同时，一个新的条纹强度极大与极小探测方法被设计出来用以克服上面提到过的其它一些问题。它的工作原理为：

1. 平滑之后，沿着每条测量弦，利用数学上极值的概念找出极大与极小强度的位置；
2. 为了检验所探测到的第 J 个极大的真实性，前一个极小值 $D_{\min}[J-1]$ 与极大值 $D_{\max}[J-1]$ 将存贮在计算机内并与之相比。如果条纹的对比，这里定义为

$$(D_{\max}[J] - D_{\min}[J-1]) / D_{\max}[J]$$

小于 0.05；或者

$$D_{\max}[J] / D_{\max}[J-1] \leq 0.70$$

那么，这个位置不采纳为真极大或峰值。上面引用的判据系由实验上得到并已被证实它们对于保证正确鉴别强度极大是有效的。

条纹定级的新方法

带有闭合环状条纹的干涉图给从前描述过的再定级程序造成了不可逾越的困难。首先，

正如从图 4 中的典型例子可以看到的，沿着同一采样弦，几个探测到的峰值可能有着同样的级，但不同的 Y 座标值。以前所采用的自动条纹定级程序，是基于一个先决条件，即沿着每条采样弦，条纹级数是线性逐一增加的。它利用把所探测到的 Y 座标值与相邻采样弦上已经定过级的条纹的 Y 座标值相比较的办法来确定起始值。这种处理办法再也不能适用于图 4 中所示的干涉图形。此外，在某些干涉图中虽然没有闭合环状条纹，但干涉仪的调节不再能使得光瞳边缘上的条纹大致平行于光瞳的水平轴向，这时，这种自动定级程序也不能正确地给条纹定级，第二，一个完整的过程通常包含着要把定过级的条纹重新描划在电视屏上，复盖在仍然呈现在那里的原始的干涉图之上，因此必须相当多地修改作图程序，以致可以分别画出顶部与底部，然后再连接相应的部份来完成该环形条纹。

图 5 显示了实验中可能出现的条纹分布状态。虽然已经采用过平滑的办法，由于噪音的存在，在每条采样弦的最大条纹级上仍然有可能探测到三个或更多个峰值。当干涉条纹的走向近于平行于采样弦时，这就有可能发生。但要注意到，这里所采用的环的概念，只能允许在最大条纹级上有多个峰值存在，否则，必须对干涉图重新进行采样。

新方法要求操作者对于每条采样弦 I 输入四个参数，即初始条纹级数 $H[I]$ ，环数 $B[I]$ ，最大的条纹级 $K[I]$ 与在最大条纹级上的峰值数 $A[I]$ 。随着这些信息打入计算机，该弦上的探测点的定级将继而按照图 6 中的流程图所示的步骤自动进行。下面进行一些较为详细的讨论。

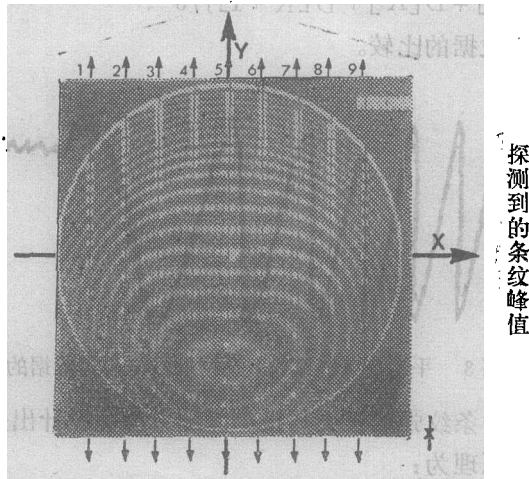


图 4 峰值探测后的具有环形条纹的干涉图

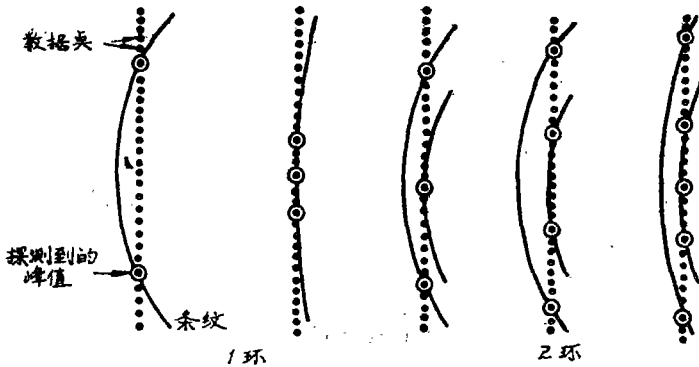


图 5 测量弦上环数的规定

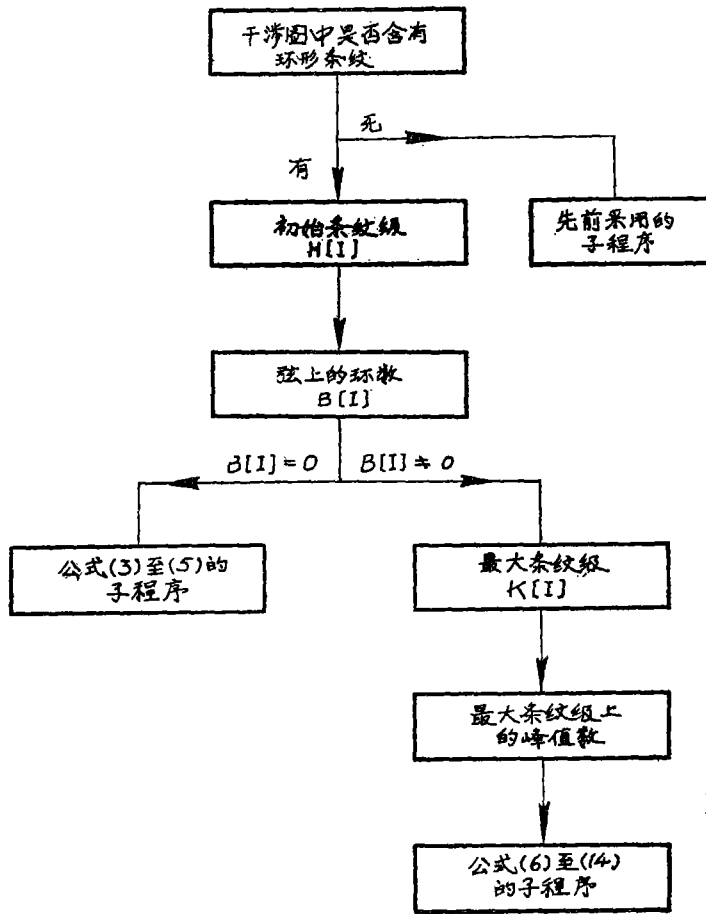


图6 条纹定级程序的流程图

1. 对于任一无环状条纹的采样弦， $B[I] = 0$ ，干涉条纹的级由初始值 $K[I]$ 开始线性增加，相应点的级数 $F_j[I]$ 为

$$F_1[I] = H[I] \quad J = 1 \quad (3)$$

$$F_j[I] = H[I] + J - 1 \quad J \geq 2 \quad (4)$$

相应地，

$$F_{\max}[I] = H[I] + J_{\max} - 1 \quad J = J_{\max} \quad (5)$$

这里 J 代表第 I 条采样弦上的第 J 个探测到的峰值。

2. 对于二个或更多个探测到峰值属于同一环状条纹的采样弦来说，譬如图4中的采样弦4，情况变得复杂得多。知道 $A[I]$ 、 $B[I]$ 、 $H[I]$ 与 $K[I]$ 的值，还要确定另外几个重要参数。第一个参数是条纹级仍然逐一线性增加、但不含有环所对应的 J 值。设该值为 K ，那么

$$K = K[I] - B[I] \quad (6)$$

第二个重要的参数是对应于最大条纹级的 J 值，此处用 C 表示。

$$C = K[I] - H[I] + 1 \quad (7)$$

计算出这二个参数后，就可以按照下面的公式定级，

$$F_j[I] = H[I] \quad J = 1 \quad (8)$$

$$F_j[I] = H[I] + J - 1 \quad J = 2 \text{至} K \quad (9)$$

$$F_J[I] = K[I] - P \quad J = K + 1 \text{ 至 } C - 1 \quad (10)$$

$$F_J[I] = K[I] \quad J = C \text{ 至 } (C + A[I]) \quad (11)$$

$$F_J[I] = K[I] - P \quad J = C + A[I] + 1 \text{ 至 } J_{\max} \quad (12)$$

其中

$$P = 1 \text{ 至 } B[I]$$

已经证实。公式(3)一(12)将成功地为图1中所示的全部干涉图定级。对该程序的唯一限制是，每条采样弦上从最大条纹级到光瞳上缘的条纹峰值数要较下半至少多一个。实践上，只要适当控制干涉仪的调节，使环状条纹的中心处于干涉图光瞳的中心之一，这个条件就可以得到满足。

作 图

在闭合条纹的情况下，把定过级的条纹作图在电视屏上，起着重要得多的作用。因为这将及时指示定级过程是否成功。当然，这种作图也变得更加困难。

这里将所采用的描划这种带有闭合环状条纹的干涉图的方法说明如下。首先，正如处理图1(a)中所示那种干涉图的情况，利用参考文献[2]中讨论过的办法，从顶部开始直到最大干涉条纹级，搜寻并连接相邻采样弦上相同条纹级的点。然后从光瞳的下部开始到最大条纹级再重复同样的过程。在最高条纹级上的点本身构成环时，程序就将分别只执行到环的上部与下部。最后再连接环的左右两端，以构成完整的条纹。同级条纹的极左与极右各端将以子程序“弧”来连接，参看图7。对于 $B[I] \neq 0$ 的采样弦，最大级条纹的连接将分别采用弧线或直线，具体地，这取决于 $A[I]$ 的值。

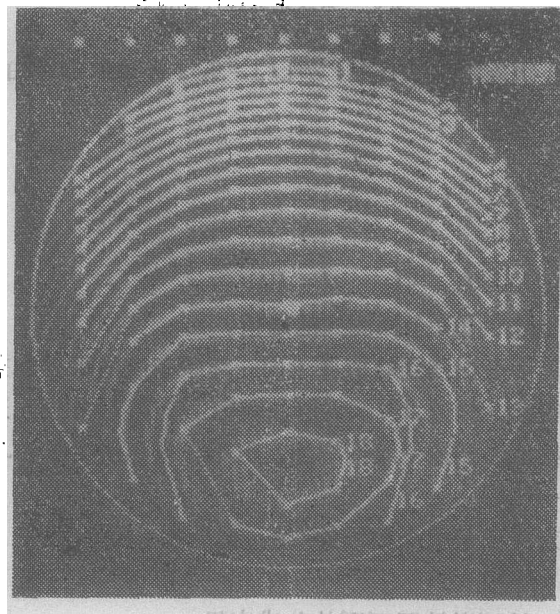


图7 干涉条纹在电视监视屏上的重画，显示定级正确

定级与吻合结果

这二个搜寻与定级条纹的程序已经用于分析 OTF 标准镜头大量的干涉图。它们的有效性已经由成功地测量与分析具有环状条纹的干涉图而证实过。图 7 表示这类干涉图被成功地定级与作图的一个例证。把由这类干涉图所得数据与二种波像差多项式吻合，其吻合残余量的 *RMS* 值，大致与利用图 1 (a) 中的干涉图形所得结果相当。图 8 表示分别用 *Seidel* 与 *Zernike* 多项式吻合有着图 1 (a) 与图 7 中的条纹分布的干涉图所得到的代表性结果。图 9 表示由这二种干涉图所得到的相应的 OTF 结果。

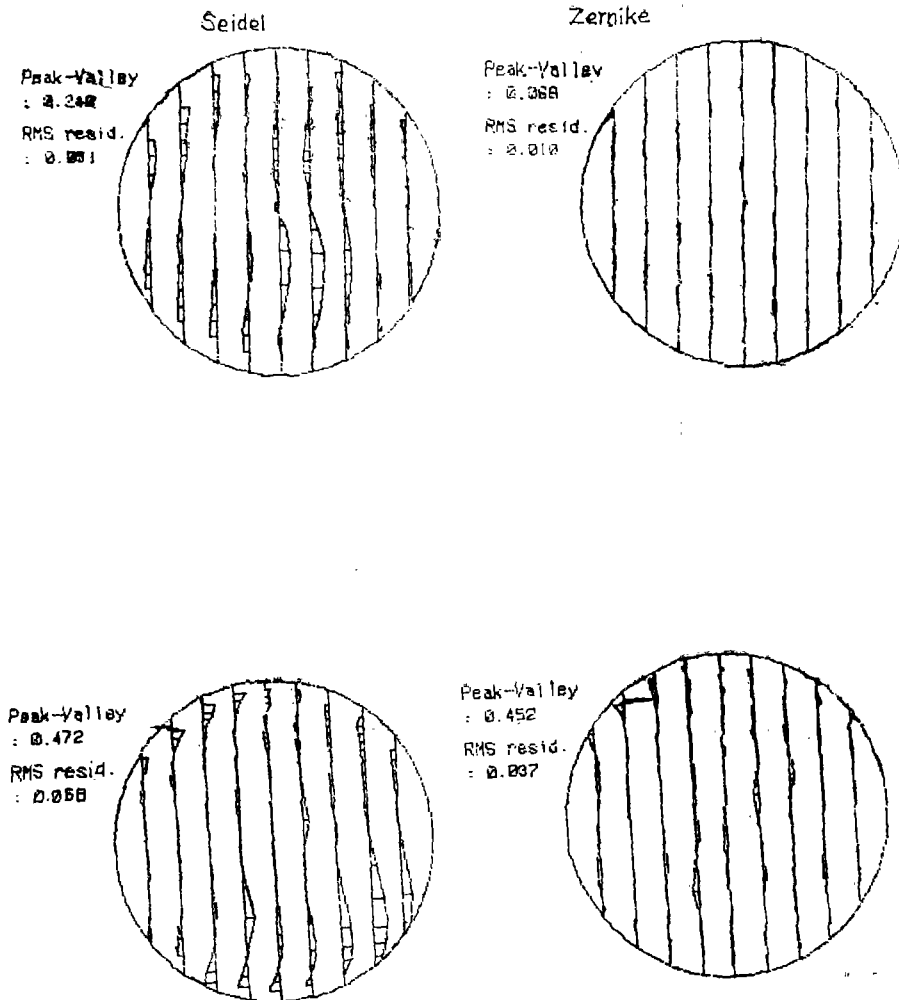


图 8 由 *Seidel* 与 *Zernike* 多项式吻合 (a) 图 1 a 与 (b) 图 1 b 中所示的干涉图所得到的吻合残余量

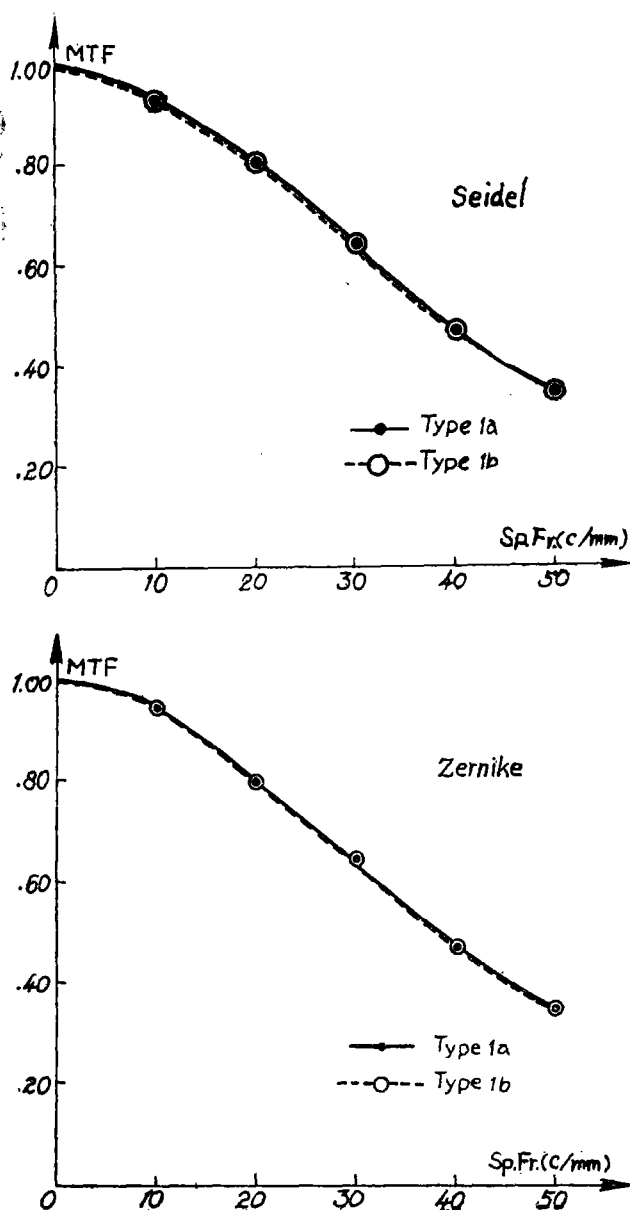


图9 用Seidel和Zernike多项式吻合有与没有环形条纹的干涉图所得到的调制传递函数结果

结 语

一组计算机程序已用HPL语言写出并用于HP9825桌上计算机，以执行这些进行条纹探测与定级的新处理办法。这些方法一直成功地应用于处理各种具有环状条纹的干涉图。可以指望，这种处理方法将在其进一步发展中应用到干涉术的其它方面。

参 考 文 献

- [1] K.G.Birch, G.Cunningham; The practical realisation of a set of standard references lenses, SPIE, 1976. 98. 2—9.
- [2] K.G.Birch et al.; A TV based system for interferogram analysis, SPIE, 1982 369, 186—193.