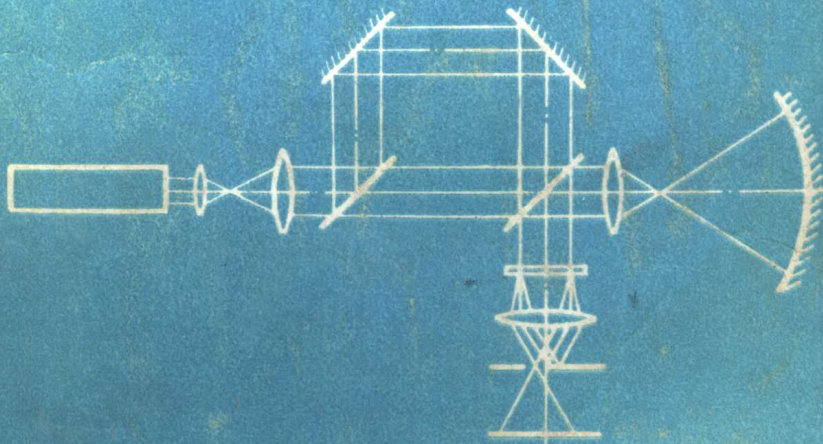


计算机制全息图

虞祖良 金国藩 编著



清华大学出版社

379
2

计算机制全息图

虞祖良 金国藩 编著

清华大学出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了使用计算机制作全息图的技术。全书主要分为三大部分：首先从通讯理论的角度介绍了计算全息图的理论基础，其次介绍了各种计算全息图的类型，重点讲述了罗曼型与干涉型两种典型计算全息图，最后列举了计算全息图在光学信息处理、干涉量度以及制作全息光学元件等方面的应用。

本书可作为大学本科生、研究生以及光学科技工作者的参考书。

计 算 机 制 全 息 图

虞祖良 金国藩 编著



清华大学出版社出版

北京 清华园

北京安华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售



开本：787×1092 1/16 印张：12.5 字数：320 千字

1984年10月第一版 1984年10月第一次印刷

印数：00001~20000

统一书号：15235·130 定价：2.50元

前 言

计算全息是建立在数字计算与现代光学的基础上的。当我 1965年在IBM工作时，由于激光器坏了，又要做全息图，在此危急的时刻，我们试用计算机代替激光器制作了全息图。很快我们发觉计算全息图比激光全息图有好多优点，但也有一些缺点，它取决于全息图的使用目的。

我们认为重要的一点是任何一种新技术的进展往往是建立在两种不同技术的结合上，计算全息即是建立在计算机科学与光学的结合上；也经常发生在不同国家人民的结合上。我与作者金国藩教授的友谊开始于1978—1979的冬天。那时他在德国爱尔兰根大学我们的试验室工作了几个月，在我与G. Weigelt教授去中国访问并在清华大学讲授“现代光学”课程时，这种友谊得到了进一步的加深。我非常希望我们的友谊将继续下去，这不仅有益于计算全息的发展，也将为我们两国之间友谊的发展做出贡献。

A. W. Lohmann

序

激光问世以后，行将消声匿迹的全息术获得了新的生命力，“全息热”风靡一时。但制作全息图的方法，过去仅限使用光学手段，即光学全息图。随着数字计算机与计算技术的迅速发展，人们广泛地使用计算机去模拟、运算、处理各种过程。在这项科学的发展中，1965年在IBM工作的罗曼(A. W. Lohmann)教授使用计算机与计算机控制的绘图机做出了世界上第一个计算全息图。它不仅可全面的记录光波的振幅与相位，而且在低噪声，高重复性，以及可记录世间不存在物体的图象等方面都远远超过了光学全息图。因此自1966年以来，国外学者在计算全息方面做了大量的研究工作。

计算全息在全息术这个分支中仍属是年轻和不成熟的。虽然很多科学工作者在这方面已做了大量的工作，但大多数是属于制作技术、精度分析、滤波应用等方面的探讨。1972年以来，布英达尔(Bryndahl)与李威汉(Wai-hon Lee)开始应用计算全息图作激光扫描器、全息光学元件、象差校正板、数据存储以及干涉计算量等工作，接着又有其他科学家将它们应用到三维显示和非球面检测等领域，均取得可喜的成果。也应指出，计算全息在工业中的应用潜力还远远未被发掘出来。

更为遗憾的是有关计算全息方面的报导大都散轶在国外各种杂志中。迄今为止，在西方国家中只有李威汉博士在“光学进展”(Progress in Optics)第16卷上有一篇专论，国内尚无这方面的书籍。为了能将这种新技术应用于我国的“四化”建设中，并为推动这一技术向前发展，我们编写了此书，以便我国科学工作者及大学生学习参考。

本书由虞祖良同志执笔，金国藩、邬敏贤、程慧玲等同志参加了讨论、改稿与编辑工作，承蒙西德爱尔兰根大学(University of Erlangen-Nürnberg)罗曼教授写了前言，美国Xidex公司高级研究员李威汉博士写了跋，在此仅表示衷心的感谢。

由于我们在这方面所做的工作仍不多，对一些问题的理解还很不够，书中错误恐在所难免，尚希望读者多多提出批评与指正。

清华大学 金国藩

目 录

前言

序

第一章	引言	(1)
1.1	计算全息的特点.....	(1)
1.2	计算全息图的分类.....	(4)
1.3	计算全息的发展简史.....	(6)
第二章	理论基础	(8)
2.1	空间脉冲调制.....	(8)
2.2	抽样定理.....	(12)
2.3	空间带宽积 空间局部频率.....	(18)
2.4	计算全息的编码.....	(22)
2.5	迂回位相.....	(24)
2.6	衍射效率.....	(25)
2.7	计算全息图的几种物理解释.....	(28)
第三章	迂回位相型计算全息图	(31)
3.1	二元付里叶变换计算全息图.....	(31)
3.2	二元像计算全息图的制作理论.....	(41)
3.3	双向计算全息图.....	(45)
第四章	修正型离轴参考光计算全息图	(48)
4.1	博奇型计算全息图.....	(48)
4.2	黄氏计算全息图.....	(50)
4.3	李威汉型延迟抽样全息图.....	(51)
第五章	相息图	(59)
5.1	相息图的基本原理和制作.....	(59)
5.2	相息图的扩展.....	(65)
第六章	计算全息干涉图	(69)
6.1	基本原理和制作技术.....	(69)
6.2	计算全息干涉图的举例.....	(75)
6.3	计算全息干涉图振幅信息的记录.....	(79)
第七章	计算全息的位相量化噪声	(85)
7.1	量化噪声.....	(86)
7.2	位相离散型相息图.....	(88)
第八章	计算全息的主要应用	(91)
8.1	光学数据处理中计算全息技术的应用.....	(91)

8·2	计算全息在干涉量度中的应用·····	(115)
8·3	计算全息激光扫描器·····	(134)
8·4	应用计算全息图显示三维图象·····	(148)
8·5	其它应用·····	(155)
跋	·····	(166)
附录	·····	(168)
参考文献	·····	(189)

第一章 引言

全息照相术是近几十年来迅速发展的一种新的成像技术^[1-4]。现在,无论在理论研究和实际应用方面,全息术都取得了很大的成绩,引起了光学领域、电讯领域以及其它领域的工作者的广泛兴趣和注意。

全息术的成像过程主要分成两步:波面的记录和波面的再现。波面记录在记录介质上就是全息图,然后应用单色光或白光照射全息图,即可再现原始物波。全息术中的“光波”一词一般是广义的,可为可见光波,声波,微波和射频波。相应的全息图分别叫光学全息图、声全息图和无线电全息图等。在本书范围内,我们只限于讨论可见光波范围内的全息术。

目前,全息图的制作可分为两种:一般光学全息和计算机制全息图(Computer-generated Hologram),简称为CGH。光学全息图就是直接用光学干涉法在记录介质上记录物光波和参考光波叠加后形成的干涉图样,这种光学全息图目前已为大多数光学工作者所熟悉。计算机制全息图是制作全息图的一种新技术,其形成和发展仅只十多年的历史。计算机制全息图是利用数字计算机来综合的全息图,它不需要物体的实际存在,而是把物波的数学描述输入数字计算机处理后,控制绘图仪输出或阴极射线显像管(CRT)显示而制成的全息图。在本书中为了叙述方便,我们把这种计算机制全息图简称为计算全息或计算全息图。近年来,由于计算机科学和技术的快速发展,数字计算机在光学领域中得到了广泛的应用,它不仅可以进行数学运算,而且可同显示装置联接以实现对大多数光学现象进行仿真。同时,由于快速付里叶变换(FFT)计算方法的出现,大大缩短了计算机进行付里叶变换所费的时间,这些,都给利用计算机技术制备全息图提供了实现的可能性,发展了计算全息技术的基础。

在过去的十多年中,许多光学和电讯工作者对于计算全息的技术和应用做了大量的工作,使得计算全息技术有了很大的发展。由于计算全息比一般的光学全息有很多独特的优点,因此引起了我国许多光学工作者的很大兴趣。我们在本书中,将主要介绍计算全息的基础理论,制作技术和应用。

1.1 计算全息的特点

计算全息图的制作和再现过程,大致可分成下述五步:

1. 选择物体或波面(数学表达式)。
2. 计算物光波在全息平面上的光场分布。
3. 把上述光场分布编码成全息图的透过率变化。
4. 把上述透过率变化显示在阴极射线显象管上,或控制绘图仪输出画在纸上,或曝光在照相软片胶片上,再经光学缩版(包括漂白处理),就制成实用的全息图。

5. 用光学再现装置再现成像。

其中第二，三步在数字计算机内进行。

一张付里叶变换计算全息图制作的典型流程图如图1.1所示。

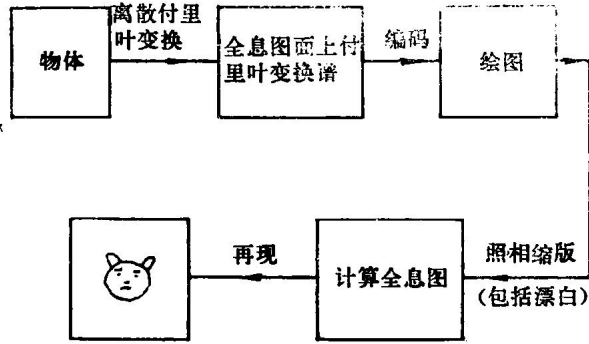


图1.1 付里叶变换计算全息图制作流程图

付里叶变换计算全息图的再现装置见图1.2。

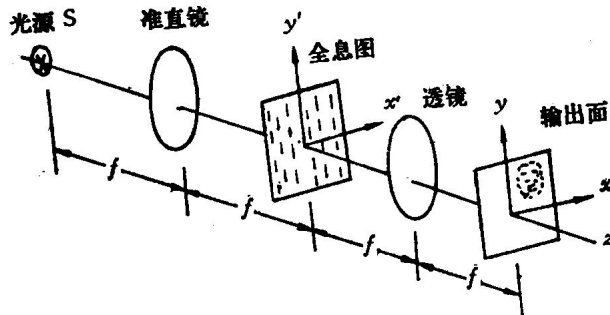


图1.2 再现付里叶变换计算全息图的光学系统

下面，我们举出两种类型的计算全息图及其再现图象。图1.3是迂回位相型计算全息图用于字符显示（中文字“光”），图1.4是干涉型计算全息图显示非球面波前。

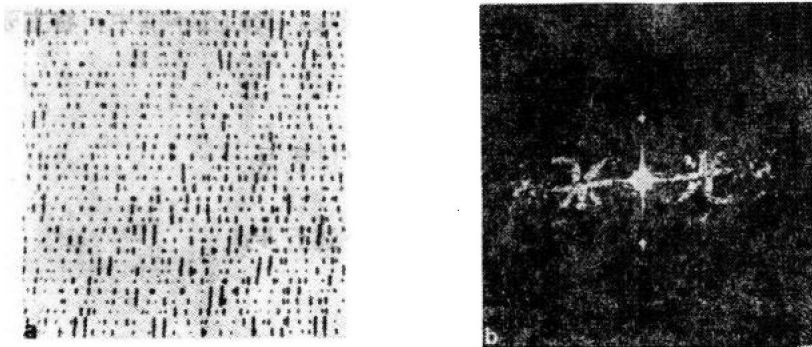


图1.3 迂回位相型计算全息图显示字符“光”

计算全息图和一般的光学全息图相比较，有以下一些独特的优点。

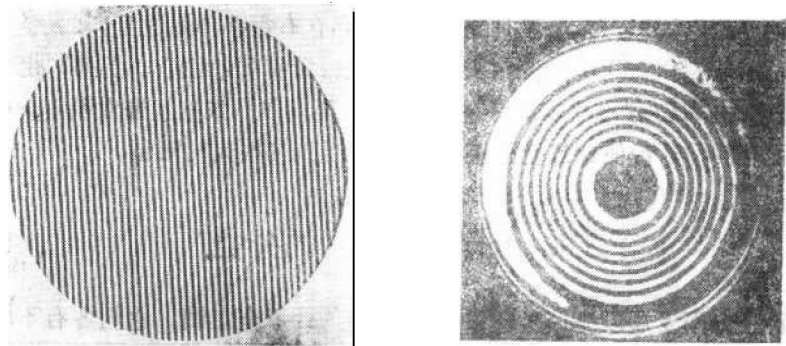


图1.4 干涉型计算全息图再现非球面波前
 (a) 计算全息图
 (b) 再现非球面波前的干涉图

1. 计算全息图功能灵活, 适用范围广。

大家知道, 制作光学全息图时, 必需要有实际的物体存在, 才能使从物体上发出(自发或反射)的光波和参考光波相干涉来制作全息图, 如果该物体不是物理存在的, 就没有办法制成所需的光学全息图。而计算全息图的制作则不然, 它不需要真实的物体存在, 而只要事先给出物波的具体数学描述(表达式), 就能利用数字计算机和显示装置综合出计算全息图, 再现该物体的图象。因此计算全息能综合世间不存在物体的全息图, 其灵活性是极高的。这种性质大大扩大了计算全息图的应用范围, 非常适用于信息处理中空间滤波器的综合, 或生成特殊的参考光波面以便用于光学波面或光学元件的检测, 或作为特殊的波面变换元件以实现光学中的广义变换运算。

2. 计算全息图大部分都是二元的, 即只有黑与白两种灰阶, 全息图的透过率函数取值为0或1。

二元计算全息图因为只需记录和识别两种信号状态, 因而抗外界干扰的能力强, 噪声少, 且易于复制, 这一点比光学全息图优越得多。光学全息图由于是应用干涉法制作的, 故在制作时对环境条件(如振动, 气流及光学零件的质量, 清洁度等等)要求较高。并且, 制成的光学全息图往往是多灰阶的, 因此对记录介质的非线性效应和底片颗粒噪声很灵敏, 很难得到完全相同的复制品。而二元计算全息图因只有两种灰阶, 故可放松对记录介质(如胶片)的线性范围要求, 因此这种二元计算全息图可直接拷贝复制由杂志、书刊上复制下来的二元全息图, 可直接应用而不会失真。

3. 二元计算全息图经漂白处理后, 变成位相型全息图, 可得到很高的衍射效率。

4. 声波、微波或其它电磁波的全息图, 可应用计算机技术来制作和再现, 这进一步扩大了全息照相术在这些领域中的应用。

5. 从历史上看, 对光学工作者来说, 计算全息最有意义的是它把计算机首次引进了光学处理领域。很多光学现象都可以应用计算机来进行仿真处理, 而计算全息图则是数字信息和光学信息之间有效的联系环节。数字计算机可以看作广义的“光学元件”, 它开拓了光学过程的计算机处理, 为后来的光学数据处理领域中广泛应用光学、电子学、

数字计算机相结合的局面拉开了序幕。

当然，计算全息技术正处于发展之中，它也存在有很多不足之处，和光学全息图相比较，计算全息图的制作在经济上费用较高（要进行计算和绘图）。另外，由于计算机储存容量，绘图仪和CRT显示器等的分辨力有限，要制作一张空间带宽积很大的计算全息图是费时和困难的，这就使计算全息图在实用中受到了很大的限制。

1.2 计算全息图的分类

自从计算全息图发展以来，出现了多种类型的计算全息图，它们各有不同的特点，应用于不同的场合。在这里，我们简单的叙述计算全息的分类及其特性，更详细的研究可见下述各章计算全息图的制作技术。

1. 像计算全息图、付里叶变换计算全息图和非涅尔计算全息图

计算全息的第一种分类法和通常的光学全息图一致，可根据物体和记录平面（即全息图平面）的相对位置不同，而分为像计算全息图，付里叶变换计算全息图和非涅尔计算全息图。

像计算全息图，被记录的复数波面直接就是物体的像场分布。在制作计算全息图时只需给出物体像场的复振幅分布，用计算机把此复振幅函数编码成全息图的透过率变化，控制绘图仪作图就得到像计算全息图的原图，再经光学制版就成为像计算全息图。像全息图可直接再现物体本身，它广泛应用于干涉测试中。

付里叶变换计算全息图，被记录的复数波面是物波函数的付里叶变换谱。因此在制作此种计算全息图时，首先必须用计算机算出物波函数的离散付里叶变换谱，这通常应用快速付里叶变换算法。然后把这种离散付里叶变换谱编码成全息图的透过率变化，用绘图仪输出记录，再经光学缩版就得到付里叶变换计算全息图。付里叶变换全息图直接再现时，出现的是物波的付里叶变换，可用加透镜进行一次逆变换的办法再现物波（见图1.2）。付里叶变换全息图广泛应用于光学数据处理中的空间滤波器或其它变换运算，这是计算全息技术中应用最广泛的领域，因此我们在下面要重点介绍其制作方法。

菲涅尔计算全息图，被记录的复数波面是物体发出的菲涅尔衍射波。在制作菲涅尔计算全息图时，首先必须求出物体发出的波前在某一特定距离平面上的菲涅尔衍射图的数字表达式，然后用计算机编码成全息图的透过率变化，由绘图仪输出记录，制成菲涅尔计算全息图。如果物体是二维的，即没有深度变化，则可用一个相当简单的积分去计算波面的菲涅尔传播，对于三维物体，则需要的计算要复杂得多，菲涅尔计算全息图一般用于图象的三维显示技术中。

2. 二元计算全息图和灰阶计算全息图

光学全息图一般都有振幅型和位相型两类，计算全息图也有这两大类，在这两类中，根据其透过率变化的特征，又可分为二元计算全息，和灰阶计算全息图下面我们分别介绍之。

振幅型灰阶计算全息图 (gray-scale hologram), 指的是计算全息图的振幅透过率函数是变化的, 灰阶计算全息图可用由计算机控制的有灰阶输出的绘图仪绘制, 或由计算机控制有灰度变化的显微密度计来显示, 然后在照相底片上记录而成。由于这种计算全息图具有灰阶变化, 因此看起来和通常的光学全息图相似, 但它是以离散形式记录的全息图。制作灰阶计算全息图时, 照相底片的非线性效应和乳胶颗粒噪声的影响很大, 在曝光, 显影各种工艺中都要十分小心。

振幅型二元计算全息图 (binary-hologram) 的振幅透过率只有两个值, 0或1, 即全息图面或是完全透明 (白), 或是完全不透明 (黑)。它的制作要比灰阶全息图简便得多, 因为现今使用的大多数绘图仪的输出只有两个灰阶 (白或黑)。因此, 二元计算全息图的制作和应用十分广泛。但无论是灰阶计算全息图, 或是二元计算全息图, 都保存了物波的全部信息, 不用灰阶全息图而用二元全息图并不会造成任何信息的丢失, 因此都能完整地再现原始物波。但由于二元计算全息图的制作经济简便, 同时其抗外界噪声干扰的能力强, 对照相底片的非线性效应不敏感, 可以多次复制而不失真。因此二元计算全息图比灰阶计算全息图更有优点, 在本书中, 我们主要讨论的是这类二元计算全息图。

位相型计算全息图和光学位相型全息图一样, 都是由振幅型全息图经过漂白工艺而成。在位相型计算全息图中, 依据透过率变化, 而分成位相型灰阶计算全息图 (bleached grey), 位相型二元计算全息图 (bleached binary) 和位相型闪烁计算全息图 (blazed hologram), 由于这类全息图都经过漂白处理, 故振幅透过率都为1, 而其位相变化示于图1.5。

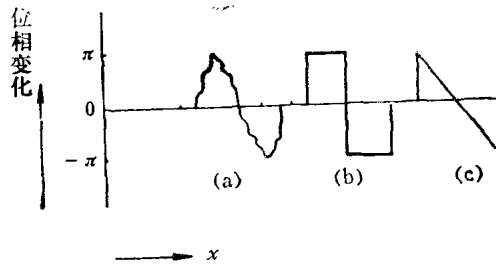


图1.5 位相型计算全息图的位相变化

- (a) 位相型灰阶计算全息图
- (b) 位相型二元计算全息图
- (c) 位相型闪烁计算全息图

上述各种位相型计算全息图制作工艺都较复杂, 但其衍射效率一般都很高, 这是其突出的优点, 特别是闪烁计算全息图, 其最大衍射效率可达100%, 详见第六节关于衍射效率的讨论。

3. 迂回位相型计算全息图、修正型离轴参考光计算全息图、相息图和计算全息干涉图

根据计算全息图制作时的不同编码技术, 计算全息图大致可分为迂回位相型计算全息图, 修正型离轴参考光计算全息图, 相息图和计算全息干涉图。这四种计算全息图的编码制作技术和特性是我们在下面第三、四、五、六章中要着重介绍的, 在这里就不叙

述了。

上述三种计算全息图分类法, 分别是从物体和全息图平面的相对位置、全息图的透过率以及全息图的编码技术这三个不同角度考虑的, 不应因而把它们分割开来。对于一张具体的计算全息图, 我们说它是一张二元的付里叶变换计算全息图。但可能因它应用了迂回位相的编码技术, 故也是迂回位相型计算全息图。我们之所以在这里应用这三种分类法, 只是为了在不同场合使用方便和便于叙述, 而绝不是要把它们截然割裂开来。

1.3 计算全息的发展简史

计算全息技术的形成和发展只有十多年的历史, 它最初就为了做相干光数据处理系统的空间滤波器。在计算全息问世以前, 只有简单的滤波函数可用一般的干涉量度术去制备, 如范德-勒格特 (Vander-lugt) 滤波器^[1-2]。因此相干光空间滤波系统的处理能力是有限的。现在, 应用计算全息技术来综合空间滤波器, 滤波函数可以为任意的复值函数, 这就大大扩展了相干光处理器的能力。

第一个报道应用数字计算机综合复数空间滤波器的是柯兹玛和凯里 (A. Kozman and D. L. Kelly) 的《硬限幅匹配滤波器》^[1-3], 这就是计算全息技术的雏型。他们制作的空间匹配滤波器先是计算一维物体的连续付里叶变换, 然后经限幅处理得到两个灰阶, 即二元透过率函数, 再由绘图得到宽度变化的白线条和黑线条, 最后照相缩版而成空间滤波器。

后来, 罗曼 (A. W. Lohmann) 把通讯理论中的抽样定理应用到空间滤波器的制作中, 奠定了计算全息图制作的理论基础, 1966年, 布鲁恩 (B. R. Brown) 和罗曼提出了几种制作二元透过的频率掩模板的技术, 可用单色光再现一般的复值波面^[1-4], 罗曼首先应用了迂回位相效应编码复数波面的位相, 这就是后来著名的迂回位相型计算全息图。它是计算全息技术的真正开端。罗曼提出的三种不同形式的迂回位相编码的计算全息图, 我们现在通常简称为罗曼 I 型, II 型, III 型计算全息图。

计算全息图中最重要的一类是付里叶变换计算全息图。其中付里叶变换关系式的计算是最重要的运算过程。但在库利-图基 (J. W. Cooley—J. W. Tukey) 的快速付里叶变换算法^[1-5]未应用于计算全息的计算中时, 制作付里叶变换全息图的计算费用很昂贵, 因此只能制作非常简单的二维合成滤波器。1967年, 巴里斯 (D. P. Paris) 把 FFT 算法应用到付里叶变换计算全息图的计算中, 大大缩短了计算全息图的计算时间。以后, 罗曼、巴里斯做了几个空间滤波试验, 证实了应用计算全息图在逆转滤波、商运算、编码传输等滤波器的制作中的优越性, 而这些滤波器用通常的光学办法是很难实现的^[1-6]。

在上述计算全息技术取得初步成果的基础上, 很多光学和电讯工作者对计算全息技术的兴趣陡增, 提出了多种计算全息图编码制作技术。其中包括在计算全息图复数信号编码中加进离轴参考光或加偏置量, 可叫做修正型的离轴参考波计算全息图。^[1-7]

赖塞姆 (L. B. Lesem) 等人提出了计算全息图的另一种形式: 相息图 (Kino—

form)^[1-8]，因它有很高的衍射效率并能同轴再现单一图象等优点，使它在今天的计算全息技术中占有特殊地位。

李威汉 (Wai-Hon Lee) 在1974年提出了计算全息干涉图制作的新技术^[1-9]。这种计算全息干涉图实际上是用计算机仿真的光学干涉图。它特别适用于制作纯位相变化的像计算全息图，再现位相型波面，因而可方便地应用于干涉量度技术及激光光栅扫描器中。

还有其它多种计算全息图编码制作技术，在这里就不再一一列举了。

计算全息图制作工艺和技术上的这些新进展，立即使人们提出并实现了计算全息技术的各种各样的新应用。但和人们最初的印象相反，今天计算全息的最有意义和应用潜力最大的领域并不仅在于其三维显示能力和空间滤波器的制作，而在于更广泛的应用，这一点将在第八章中详细论述。

纵观计算全息技术的发展历史，可以看出它是在光信息处理技术的要求下产生的，同时也由于计算机技术和FFT算法的应用才得到迅速发展。目前，计算全息技术的应用越来越普遍。在杂志、书刊上发表的文章也很多，广泛地研究着计算全息的各个课题。这些不同的研究粗略的可分为三个方面：(1)计算全息图制作的编码技术，主要讨论如何把复值波面编码转换为实的非负值函数，以进行记录。(2)提高计算全息图的质量，降低其再现波面的误差。(3)计算全息技术的应用。在应用中大致有：空间滤波器的制作、干涉量度术、激光光束扫描、图象的三维显示及其它方面。

我们在本书中，将按照上述三个方面简单地介绍计算全息的技术和应用。今天，我国的光学工作者对计算全息这门新技术的兴趣越来越大，因此如能推动计算全息技术在实践中的应用，对于促进我国光学技术的进一步发展将是很有意义的。

第二章 理论 基础

在叙述计算全息的技术和应用之前，我们要在本章中详细的讲述计算全息的一些理论。我们假定读者对光学衍射理论、光学全息术的基本原理以及透镜的付里叶变换特性都是清楚的，并且对于付里叶分析和线性系统理论具有相当的基础。这些理论是计算全息理论的重要组成部分，在本章中，我们将不准备详细论述，而只引用有关的结论。读者如需深入了解这方面的知识，可参阅有关的文章和书籍。^[2-1, 2-2, 2-3]

首先，着重从通讯理论的角度来讲述计算全息的基础理论，目的是为光学工作者提供更多的通讯理论知识，使这两门学科的结合更富有成果。从全息照相的发展历史来看，全息术和通讯理论具有十分紧密的联系，而在计算全息的形成和发展中，通讯中的一些概念、术语、原理和数学工具更是起着极其重要的作用。用通讯理论来讲述计算全息的理论基础，会更方便和更深入的理解计算全息术。同时，计算全息图在某些情况下也有可能作为图象或数据传输的一种方式，使得在通讯技术中变得很有用。为此，在本章中，我们将着重讲述计算全息术中应用的一些通讯理论，并且指出它们是如何从电讯系统移植到计算全息这一领域中来的。

2.1 空间 脉冲 调制

二元计算全息图可以理解为光学中空间讯号脉冲调制的结果，它是通讯中时间讯号的脉冲调制技术在全息照相中的应用。只要把时间讯号换成空间讯号，并由一维形式推广到二维形式，通讯中的脉冲调制理论就可以搬到计算全息技术中来。在这里，我们首先要简单地介绍通讯中的调制理论，然后叙述如何把它移植到光学中来。在电讯系统中，欲把被传送的电讯号波形（叫做基带信号）变到频分复用信道系统的指定频带或时分复用信道系统的适当时隙，这种处理过程就叫调制。调制不仅容许多信号在同一信道中彼此无干扰地同时传送，而且还可以使它更有效地传送。

模拟时间讯号 $S(t)$ 的调制包括幅度调制（调幅）和频率调制（调频或调相）。调幅时，一个高频载波信号的振幅值随调制信号（低频基带信号）作同样的变化。而在调频或调相中，载波信号的频率或相位将随调制信号而变化。图2.1分别表示基带信号、载波、调幅波和调频（相）波的波形图。

另一方面，通讯系统中更有效的调制技术是脉冲调制。由抽样定理（见下节）可以证明，一个最高频谱分量为 f_c 赫的频带有限信号 $S(t)$ 可由其均匀间隔 $1/2f_c$ 秒（或更小）的各个抽样值完全确定。我们只需要在有限个瞬间（每秒 $2f_c$ 个）传送信号，去代替连续地传送完整信号 $S(t)$ ，这样抽样后的信息可以由脉冲调制传送。即对连续时间信号 $S(t)$ 抽样后，编码成脉冲序列来传送。脉冲调制主要分为脉冲幅度调制（PAM）、脉冲宽度调制（PWM）、脉冲位置调制（PPM）（以及脉冲编码调制）。其中脉冲幅度调

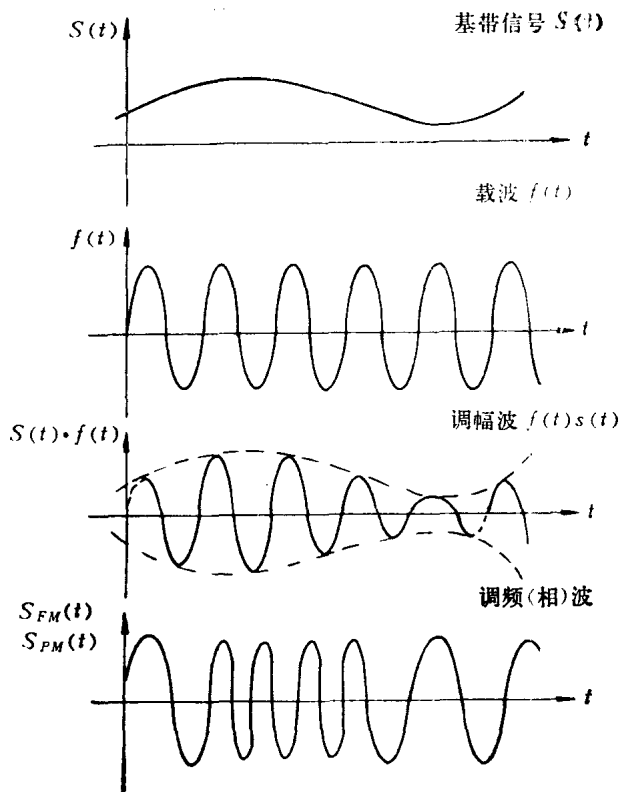


图2.1 模拟时间信号的调制

在这三种脉冲调制形式中，我们对脉冲位置调制和脉冲宽度调制特别感兴趣。因为经这两种脉冲调制后的脉冲幅度已二值化了，换句话说，脉冲已是二元的了。在传输信道中也就只传送二元脉冲。这种二元系统可用信道带宽来换取输出讯号的高信噪比。如果信道有足够高的带宽，允许利用矩形脉冲传送，从理论上讲，传送中的加性干扰噪声对解调后的信号的

制是最简单的方法，即在各个时刻传输的脉冲幅度将随基带信号的抽样值而变化。如果传输脉冲的宽度和位置随着基带信号的抽样值变化而变化，就分别叫做脉冲宽度调制和脉冲位置调制。脉冲调制信号的复原（即解调）可应用一个带通滤波器来处理，经过解调后，就可复原为原始的基带信号 $S(t)$ 。

图2.2分别表示这三种脉冲调制形式

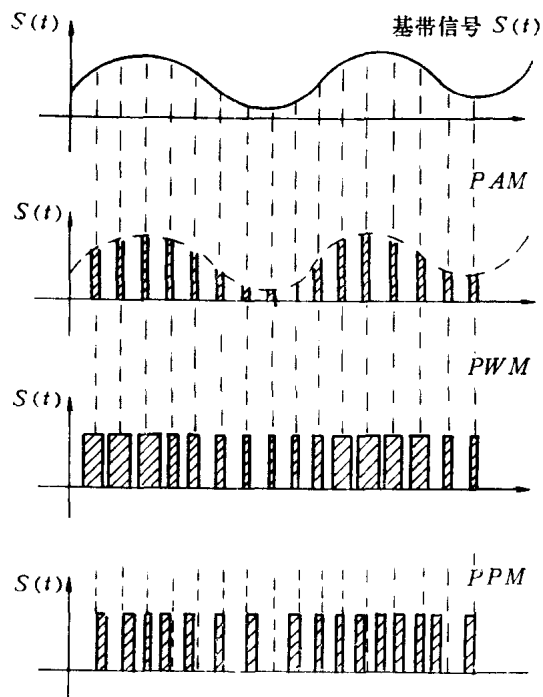


图2.2 三种脉冲调制波

影响是可以忽略不计的，因此输出讯号有高信噪比。现以图 2.3 来说明这一原因。

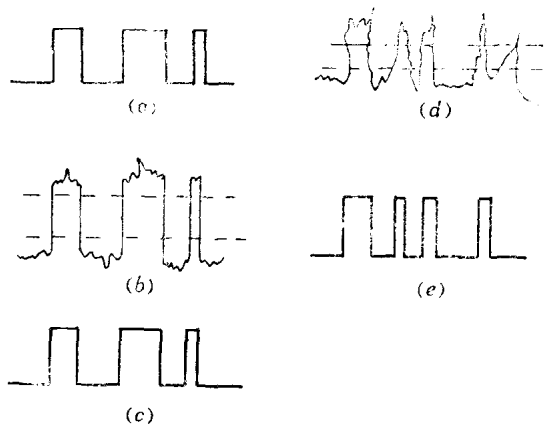


图2.3 二元脉冲传送中加性噪声的影响

- (a)宽带的脉冲宽度调制 (PWM) 信号
- (b)a信号加上低电平噪声
- (c)b信号经限幅放大后的信号
- (d)a信号加上高电平噪声
- (e)d信号的限幅放大信号

在上图中，如果传送的是宽带的脉冲宽度调制信号序列a，当其被噪声干扰时，就成为有噪声的信号b，然后对它进行限幅截断和放大，就产生了与a信号完全相同的信号c。可见低电平加性噪声对解调信号无影响。当然若噪声大过截断电平，则也会产生假脉冲（见d,e），但这是在噪声很大的信道中才会发生。另一方面，如果传输信道的带宽不够大，不能应用矩形脉冲波，则会使脉冲的上升和下降时间不够短，此时幅度达不到截断电平的噪声，仍然能够改变脉冲的宽度和位置，因而在解调输出信号中引入噪声。但如果带宽足够高，允许利用矩形脉冲传送，则由上图可见，可以在输出信号中滤去噪声，得到很高的信噪比，这就是脉冲位置调制和脉冲宽度调制后得到的二元信号系统的明显优点。二元计算全息图正是充分利用了这一优点，使其在今天取得广泛地应用。

电讯号中的调制理论和技术完全可以移植到光学中来，这是因为通讯系统和光学中的成像、数据处理系统都是用来收集或传递信息的。电讯中是对时间讯号波形（电压或电流波形）进行调制，而光学中则是对空间讯号波形（光波振幅或强度的空间分布）进行调制。但在本质上，这二者是无差别的，因此处理技术可以互相借鉴和渗透。从历史上看，光学中空间讯号的调制并不是新东西，但形成明确的概念却是近期的事情。在印刷工业中长期应用的半色调染印术就是空间脉冲调制的典型例子，半色调印刷时，一张图象由等距分布而大小不等的点子组成，点的尺寸变化反映了图象的灰阶变化，这实际上是二维空间讯号的脉冲面积调制 (PSM) [2-4]。1899年由伍德(Wood)发明的载频摄影则是空间模拟信号振幅调制的例子[2-5]。

从本世纪六十年代开始，调制理论在光学全息照相和范德-勒格特空间滤波器的综