什么是计算全息?

高文琦 叶权书

(南京大学物理系)

一、计算全息的意义

计算全息术是全息术的一个重要分支．六十年代初全息术开始发展后不久，计算全息术即随之出现．它与一般全息术(指光产生的全息)的区别在于：全息记录与再现过程的一部分由计算机取代．根据所取代部分的不同，又可分为计算机产生的全息图和全息图的计算机再现两种，通常都简称为计算全息．

值得指出的是：计算机所取代的部分只是人对自然过程的一种模拟．正如计算全息的创始人 Lohmann[1] 所指出的那样：在一般全息术里，光波的传播完全按自然界的客观规律进行，也就是严格遵守反映这些规律的麦克斯韦方程．而在计算机里进行的模拟过程，是按照人的意图来进行的．它只反映人对全息过程的理解，却不能象自然过程那样帮助人验证其理解的正误．当然，这并不是说计算全息就不能从客观世界来检验其正误了．计算机取代的只是全息过程中的一部分，模拟部分的正误还可由全过程的最后实践结果来判断．

那么，为什么要用模拟来取代光的自然传播过程呢？正如其它科学领域里也作各式各样的模拟试验一样，近代科学各分支的发展史表明：只有当所研究的对象能数字化且能人工模拟时，人类对此对象的认识才能迅速深化．因为能做到数字化就能进行量的分析，并能充分运用近代科学成就如计算机和计算技术的成果；而能做到人工模拟就能随意改变其中参数以观察改变的效果．计算全息是具有以上特点的．T. S.Huang[2] 指出：计算全息的深远意义在于——数字计算机第一次作为光学元件出现在光学系统之中．意思也就指此．

还值得指出的是，目前的模拟手段是电子数字计算机．一般说来，电子数字计算机的精度比模拟计算机高，把电子数字计算机用作模拟，说明在科学各分支之间电子数字计算机处于相对领先的地位，各分支必须借助于它以获得推动．但是，这种状态不是绝对的，完全可以设想在不远的将来，可能有别的计算技术(例如目前呼声很高的光计算机)取代电子数字计算机．到那时，不是电子数字计算机模拟光的传播，而是光计算机取代电子数字计算机执行某些计算任务．目前世界上科技领先的各国都很注意光计算的研究．在研制光计算机的前驱中，不少人同时就是计算全息方面的专家，如 Lohmann, Stroke[3], Huang 等．这是不足为奇的，因为计算全息是全息技术与计算技术相结合的产物，正象一切边缘科学那样，它既随着两门学科的发展而发展，反过来，它自己的发展又必然会推动两门学科的发展．在全息术方面，计算全息作为一种重要的理论探讨手段，对全息理论的发展会起长远的基本的作用；在计算技术方面，随着光计算(具有极高的运算速度和存贮容量)的发展，可以预期今后必然会给计算技术带来深刻的变革．

除了这些理论方面和长远方面的意义以外，计算全息目前已在若干方面取得了实用成果，以下将分别介绍．

二、计算全息的原理

我们以最常见的二维傅里叶全息术为例，介绍计算全息的原理．在光学上，实现傅里叶变换是很方便的．只要把平面物体放在透镜的前焦面上，以平行相干光照明，则在透镜的后焦面上的光场分布就是物的傅里叶频谱．引入平面参考波，那么在此频谱平面上记录的全息图就是傅里叶变换全息图．再现时，把全息图放在透镜的前焦面上，以平行相干光照明，在透镜的后焦面上就可以再现原来的物的象．用数学语言来讲，全息图的记录是一次正傅里叶变换

$$\tilde{u}(\nu, \mu) = \iint u(x, y) e^{-i2\pi(\nu x+\mu y)} dx dy, \qquad (1)$$

式中 $u(x, y)$ 是要再现的物，称为物函数；$\tilde{u}(\nu, \mu)$ 就是物的傅里叶谱，称为谱函数．全息图再现则是一次逆傅里叶变换

$$u(x, y) = \iint \tilde{u}(\nu, \mu) e^{i2\pi(x\nu+y\mu)} d\nu d\mu. \qquad (2)$$

在一般全息术中，这两次傅里叶变换都是采用光学方法，即如前述用透镜来完成的．而在计算全息中是用计算机取代两者中的一个．如果取代的是第一步正傅里叶变换，就称为计算机产生的全息图．这里着重介绍这一种．由于数字计算机只能以数字信号输入，所以物函数 $u(x, y)$ 是以离散值形式表示的，也就是以

一定规律对所要再现的物取样。例如所要再现的为“中”字，就可将“中”字写在方格纸上，如图1所示那样进行取样，有字迹处的方格取值为1，无字迹处的方格取值为0。这种编码方式称为二元(0，1)编码。取样点密度要求满足取样定理。一般要求不高的字符取样点取16×16即可，要求高的字符可取32×32或64×64。若再现的为复杂图形，二元编码不够，还可按一定灰度等级编码。显然，灰度等级愈多，取样点数愈多，所表示的图象也就愈清晰。如果取样点数为$N\times N$，灰度等级为M，那么所表示图象的信息量L为

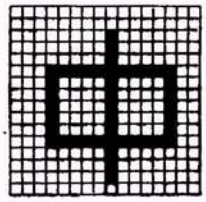

图1　物函数取样

$$L = N^2 \cdot \log_2 M, \qquad (3)$$

L的单位为bit。一张高质量图象的bit数约为10^8。我们再现的“中”字取样点数只有16×16，即$N=16$，二元编码$M=2$，代入(3)式算得$L=256$ bits。这样小的信息量加上模拟和再现过程中不可避免的噪音，因此再现象“中”的质量是不高的。

把取样了的物函数送入计算机，就可算得其频谱。谱函数也是离散的。根据傅里叶变换的性质，物函数为实函数时，谱函数一般为复函数。也就是所得谱函数的离散值为复数，即

$$\tilde{u}(m\Delta\nu, n\Delta\mu) = \tilde{u}_{mn} = A_{mn}e^{i\phi_{mn}}, \qquad (4)$$

式中$\Delta\nu$，$\Delta\mu$为取样点距；m，n为取样点序数；$\tilde{u}(m\Delta\nu, n\Delta\mu)$为第$m$，$n$个离散值；$\tilde{u}_{mn}$为此离散值的省略符号；$A_{mn}$为离散值$\tilde{u}_{mn}$的模；$\phi_{mn}$为离散值$\tilde{u}_{mn}$的幅角。如果我们模拟的$A_{mn}$的确与实际存在于该点的傅里叶谱的振幅成比例，而$\phi_{mn}$的确等于该点傅里叶谱的位相，那么就达到了模拟全息过程的目的。理论分析表明这是需要一定条件的。为了简单起见，假设已经满足了所需的条件，以下的问题就是根据这些数值作出所需要的全息图。

作全息图的方法有多种，我们介绍一种Lohmann[4]方法：先将全息图按取样点数目分成若干个小单元，每个小单元对应于谱函数一个取样点。分别在各个小单元内画小的长方孔如图2，使孔的高度与A_{mn}成正比，孔中心的横坐标由取样点的横坐标$(m\Delta\nu, n\Delta\mu)$向右偏移一个与ϕ_{mn}成比例的距离$\left(\frac{\Delta\nu}{2\pi}\right)\phi_{mn}$，孔的宽度$c\Delta\nu$一定。这样就得到一个长方孔阵，长方孔的个数等于取样点数，大小和位置分别对应于谱函数取样点的振幅和位相。用照相机把此图精缩数百倍，所得照相底片即是计算机产生的全息图，简称为计算全息图。

再现时只要将此全息图放在透镜的前焦面上，用激光照射(如图3所示)，在透镜的后焦面上就再现出物函数的象。这是严格按傅里叶变换条件再现的象。也可以不用透镜，直接将激光照射到全息图上，在远离全息图的后方也能再现出物函数的象。这是按方和斐衍射条件再现的象。图4为南京大学物理系试制的计算全息图所再现的象，图为严格按傅里叶变换条件再现的象。象的取样点数都是16×16，全息图的画法稍有不同。

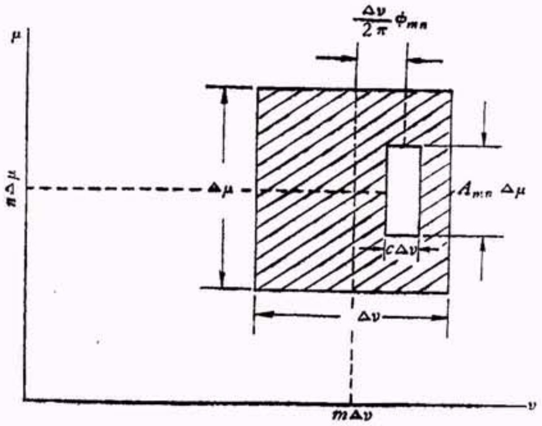

图2　Lohmann作图法

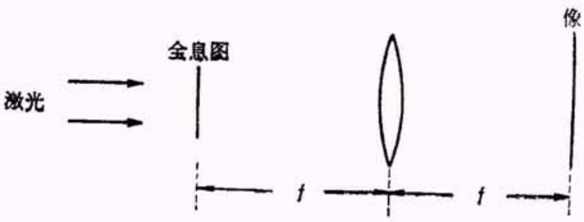

图3　计算全息图再现

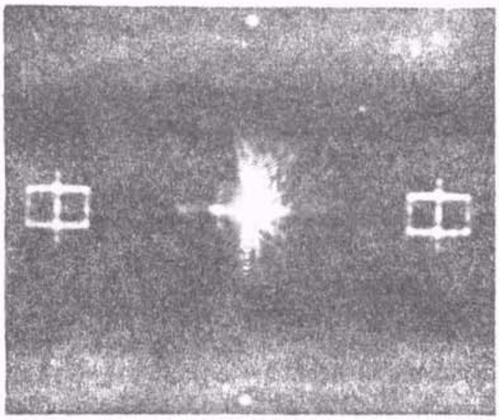

图4　计算全息图再现的象

三、计算全息的应用

原则上讲，能用全息术的地方也能用计算全息。全息图的本领是对波阵面进行调制。透过全息图所以能

看到三维图象，就是因为全息图能将投射到它上面的光波波阵面，调制为所需要的波阵面，具有这种波阵面的光波投射到人眼就能引起立体的视觉．计算全息图是人工模拟的全息图，同样也能调制波阵面．但它与一般全息不同之处在于：在制作一般全息图时需要有真正的物存在，而制作计算全息图只需要数学上存在的物，也就是只需要知道由离散值构成的物函数就行．在工程技术中，设计了某种曲面（例如船体、弹头、飞船等外壳）就可以只从它的数学表达式用计算全息术再现其立体图象．具体作法是：将已知的物函数取离散值，送入计算机算其傅里叶频谱，根据算得的频谱作全息图，然后用光学方法再现它，就可获得所设计的立体形象．我们知道，除了光以外，无线电波、X射线、γ射线、超声波、亚声波等都能穿透不同的介质，可以从透过物体的衍射波数据（含有大量的所探测物的信息），经过计算机计算而获得物函数．实际上，这就是前面提到的计算全息的另一个分支——全息图的计算机再现．目前，在医学检验、晶体结构研究、大分子研究等领域，全息图计算机再现的方法有广泛的应用前景．

计算全息图调制波阵面的本领与一般全息不同的地方还在于它的灵活性．我们可以根据各种需要来制作各种计算全息图，因此它特别适合于用作光学信息处理中的空间滤波器．所谓光学信息处理，就是对光波进行处理以提取必要的信息，去掉不必要的杂波．光波所带的信息存在于波阵面中．具体说来，光波在某平面上各点所引起的光振动可以用复函数

$$\tilde{u}(\nu, \mu) = A(\nu, \mu)e^{i\phi(\nu, \mu)}$$

来描述，这里 A, ϕ 分别为点 (ν, μ) 光振动的振幅和位相，$\tilde{u}(\nu, \mu)$ 函数中既包含信息也包含杂波．所谓处理就是对此复函数进行一定的运算，即把 $\tilde{u}(\nu, \mu)$ 改变成所需要的形式 $\tilde{v}(\nu, \mu)$．这种运算一般可以写成

$$\tilde{v}(\nu, \mu) = \tilde{H}(\nu, \mu)\tilde{u}(\nu, \mu).$$

复函数 $\tilde{H}(\nu, \mu)$ 完全由所需处理的类型（如各种去模糊、特征识别等）决定．如果处理是在空间频域内进行，这种处理与无线电技术中时间频域内的滤波相应，因此可以称为空间滤波．具体作法可以这样，用计算全息制作一片透射率与 $\tilde{H}(\nu, \mu)$ 成比例的平面模片，放在空间频率平面内，当光振动为 $\tilde{u}(\nu, \mu)$ 的光投射到此模片上，模片后的光振动就是 $\tilde{u}(\nu, \mu)$ 与 $\tilde{H}(\nu, \mu)$ 的乘积 $\tilde{v}(\nu, \mu)$，从而达到了空间滤波的目的．这种模片就称为空间滤波器．由于各种需要，函数 $\tilde{H}(\nu, \mu)$ 可能是各种各样的，因此用别的方法制作空间滤波器有其局限性．从灵活性来说，计算全息术是制作空间滤波器最理想的方法，因而受到广泛重视．

除了以上这些用途以外，计算全息还可用于光存贮，曲面检测等．当然计算全息也有其不足之处．当取样点数过多时，对计算机的要求过高（存贮容量大，计算时间长），因而生产费用高．此外，绘制计算全息图需用计算机控制的自动绘图器，由于分辨率有限，图形也不能过大，不可能把计算机算得的数据全部精确地用图表示出来．具体说来，图形大小的限制产生截断误差（频谱得去掉一部分），灰度等级的限制会产生量子化误差（频谱值不能精确表示出来），光再现时相干光照射会产生相干光噪音等．由于这些因素的影响，以致上述许多应用有些只停留于实验室阶段．目前国内外正积极开展这方面的研究工作，进展速度相当快，因此计算全息的前途是光明的．

参 考 文 献

[1] A. W. Lohmann, S. P. I. E. Seminar Proc., 25 (1971), 43.

[2] T. S. Huang, Proc. IEEE., 59(1971), 1335.

[3] G. W. Stroke, Interna. Opt. Compu. Conference, 1976, 1.

[4] A. W. Lohmann, D. P. Paris, *Appl. Opt.*, 7 (1968), 651.

（上接第566页）

Clerk Maxwell, (1882), 344.

[2] J. C. Maxwell, The Scientific Papers, (1890), Vol. 2, 242—244.

[3] J. C. Maxwell, The Scientific Papers, (1890), Vol. 2, 247—248.

[4] L. Campell and W. Garnett, The Life of James Clerk Maxwell, (1882), 465.

[5] J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, (1904), p. ix.

[6] J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Mangnetism (1904). p. viii.

[7] J. C. Maxwell, The Scientific Papers, (1890), Vol. 1, 155.

[8] J. C. Maxwell, The Scientific Papers, (1890), Vol. 1, 452.

[9] J. C. Maxwell, The Scientific Papers, (1890), Vol. 1, 158.

[10] J. C. Maxwell, The Scientific Papers, (1890), Vol. 1, 451.

[11] J. C. Maxwell, The Scientific Papers, (1890), Vol. 1, 467.

[12] J. C. Maxwell, The Scientific Papers, (1890), Vol. 1, 526—527.

[13] Т. П. Кравец, Природа, № 11,(1931), 1041—1060.