

专题八 信息光学

物理学院2018级 杨佳宇
2019年10月30日

目录

- 信息光学简介
- 阿贝成像
- 小波变换
- 全息及应用

1.信息光学简介

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

●信息光学是什么？

从信息论的观点看来，无论是电学、光学及声学系统,都是用来传递信息的。

电学系统传递的是随时间变化的电讯号，而光学系统传递的是随空间变化的图象。

信息光学：有关图象的传递理论与应用技术

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

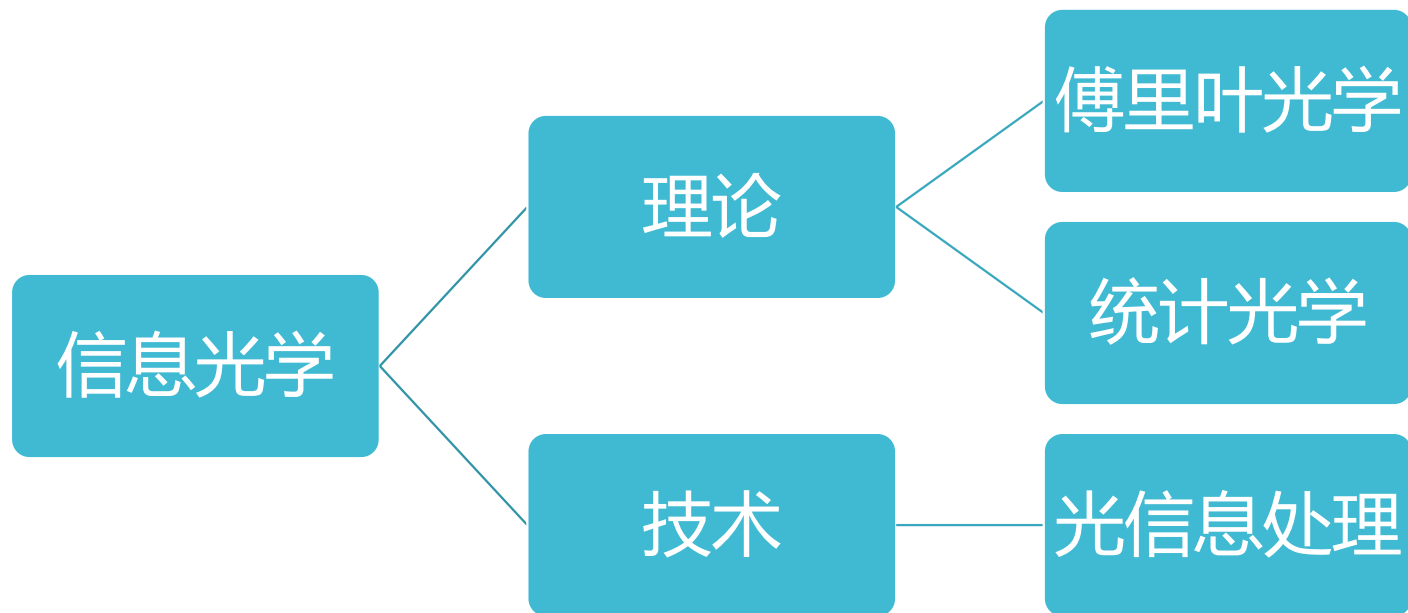
4. 全息及应用

●信息光学的发展

- 信息光学是光学最先开拓的领域之一,可以追溯到原始光学初期。但获得迅速发展还是最近30多年的事。
- 50年代中期,无线电通讯理论和技术引进到光学中来,推动了信息光学的发展。
- 60年代后,激光技术、全息照相技术的相继出现,电子计算机的普遍应用,特别是遥感技术的需要,更加促进了信息光学的发展。

1. 信息光学简介

- 2. 阿贝成像
- 3. 小波变换
- 4. 全息及应用



1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

● 信息光学的理论——傅里叶光学理论

- 主要内容：线性系统理论与频谱分析
- 目的：用光学方法实现二维函数的傅里叶变换, 在频域中描述和处理光学信息。
- 从物理上讲, 傅里叶变换是把一复杂的光场分布既物空间函数加以分解, 分解成为一系列单一频率的点源的叠加。其逆变换则是把一系列单一频率的点源加以合成。
- 光学传递函数：度量一个光学系统对输入的物空间的频率的响应程度。

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

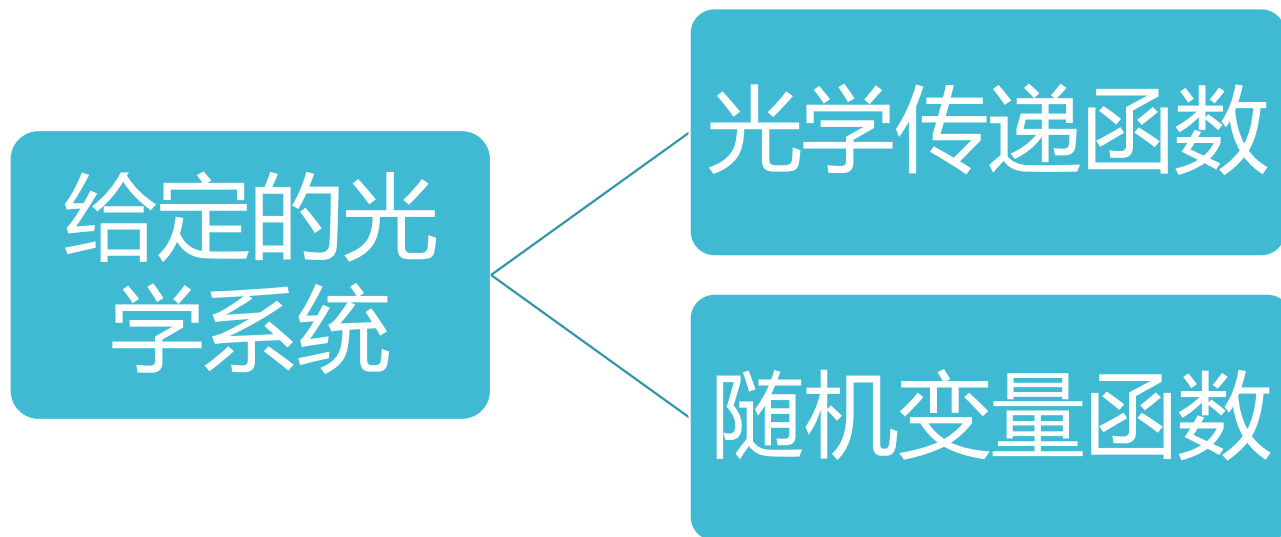
● 信息光学的理论——统计光学理论

- 统计光学：用统计的方法研究光学过程的统计特性
- 如果把不同的电磁振动看成是不同的光量子, 则单个光量子的随机行为是无法确定的, 而大量光量子的随机行为却遵从一定的统计规律。
- 但信息光学所侧重的是光波场的涨落性质及探测方法。信息光学统计理论主要研究光“噪声”的产生、控制乃至消除的问题。
- 一个光波场的随机变化过程, 可以用随机变量来描述, 而随机变量又可表示为概率分布函数和概率密度函数, 统称为随机变量函数。
- 随机变量函数：反映一个光学系统的随机变化规律

● 信息光学的理论

1. 信息光学简介

- 2. 阿贝成像
- 3. 小波变换
- 4. 全息及应用



1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

●信息光学的技术——合成孔径技术

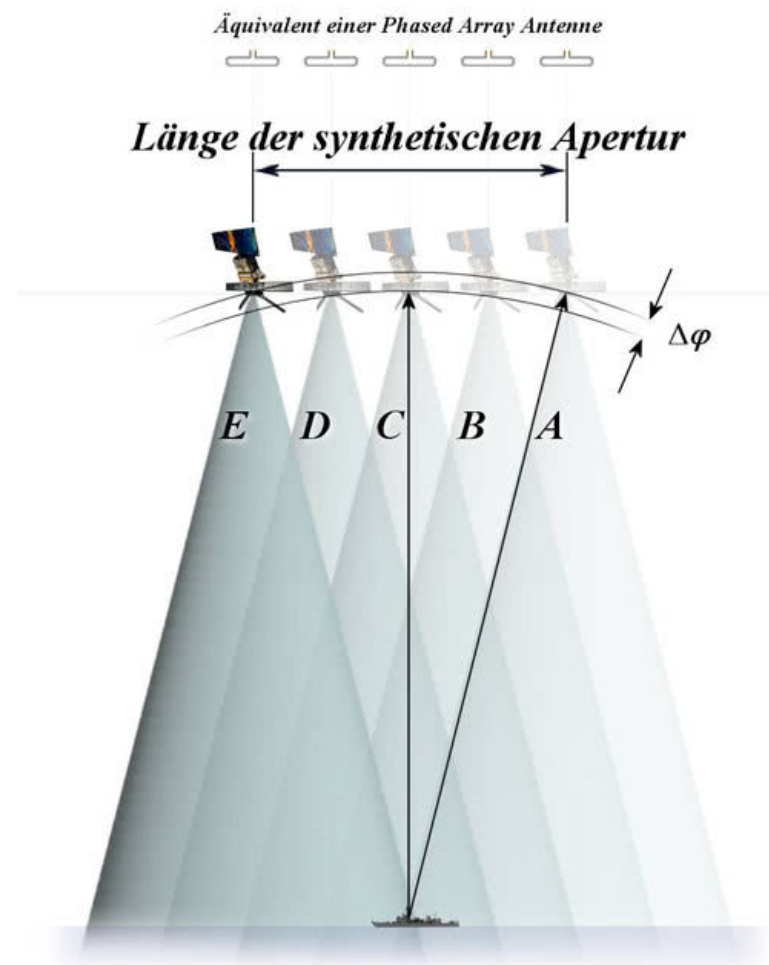
- 光学仪器的分辨率是与其通光孔径成正比的,这无论对可见光还是无线电波, 制造大口径物镜或天线都有很多困难。
- 采用小口径天线或望远镜在某确定区域按一定时空规律地抽样观测, 再把这些结果加以相干合成, 就相当于合成了一大口径天线或物镜的观测效果。

●信息光学的技术——合成孔径技术

星载SAR：

在目标的飞行路径上间隔取样，相干累加，获得与大尺寸雷达观测相同的效果

Synthetic Aperture Radar：
合成孔径雷达



1. 信息光学简介

2. 阿贝成像
3. 小波变换
4. 全息及应用

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

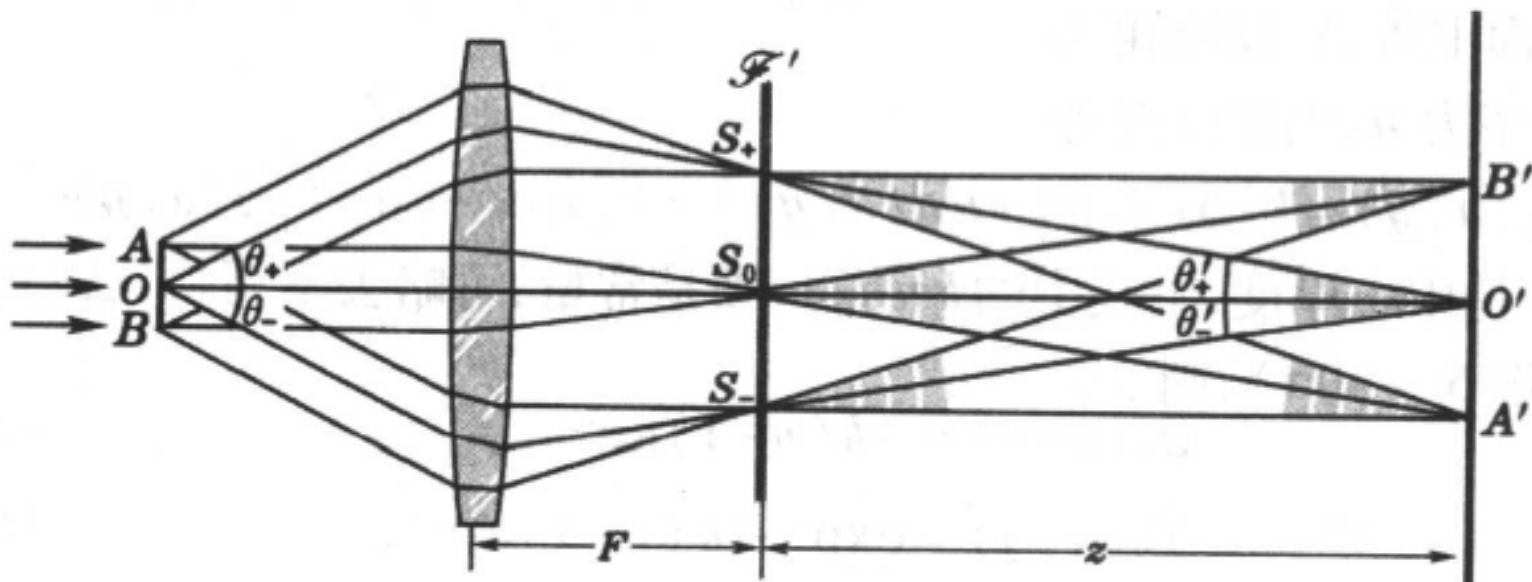
4. 全息及应用

●信息光学的技术——全息照相

- 一个简单的光振动：振幅+位相，振动迅速
- 普通照相：只能记录光强分布, 而无法记录光的位相。普通照片就失去了物体原有的立体结构。
- 全息照相：记录振幅信息和相位信息。只要能使物体所衍射的光波与另外的光波产生干涉并记录在某种介质中, 那么当用适当的方法照明该介质时, 就能得到三维的立体图象。

2.阿贝成像

●阿贝成像原理是什么？



用平行光照明傍轴小物 AOB,使整个系统成为相干成像系统，即物体发出的光可以作为完全相干光来处理。像成于 A'O'B'。如何看待这个系统的成像过程？

1. 信息光学简介

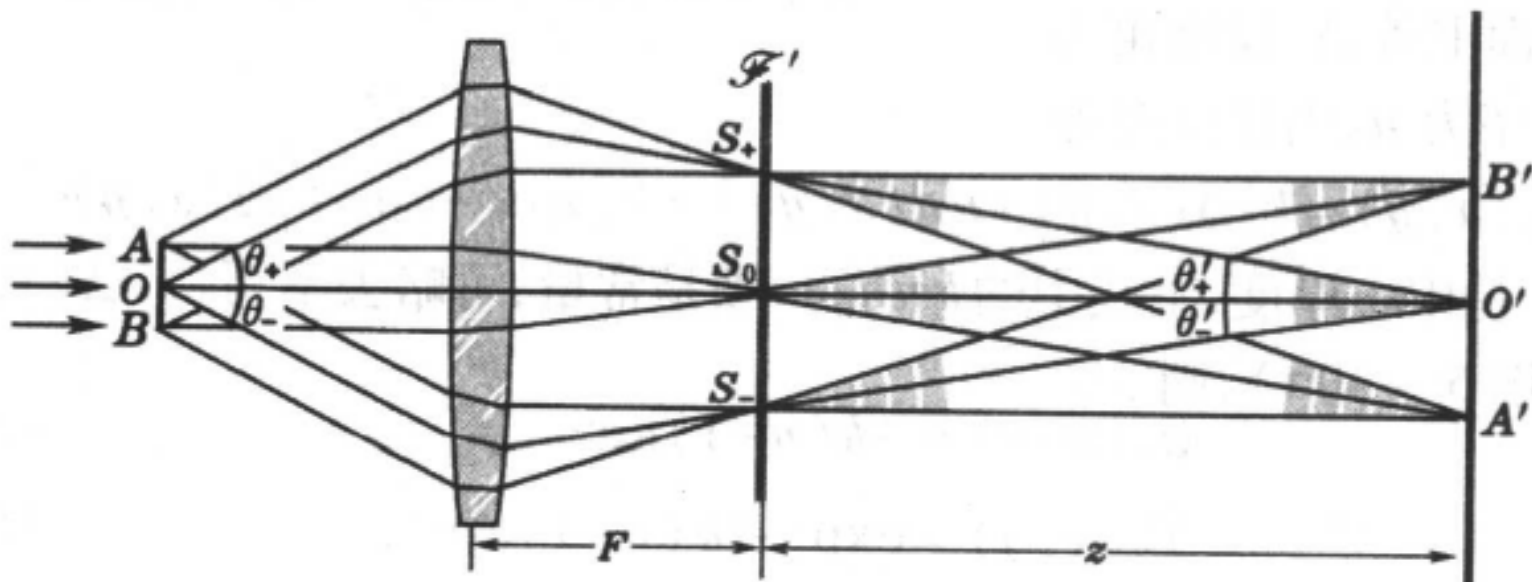
2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

1. 信息光学简介
2. 阿贝成像
3. 小波变换
4. 全息及应用

●阿贝成像原理是什么？



传统几何光学：物是点 A、O、B 等的集合，它们都是次波源，各自发出同心光束（球面波），经透镜后分别会聚到像点 A'O'B' 等。

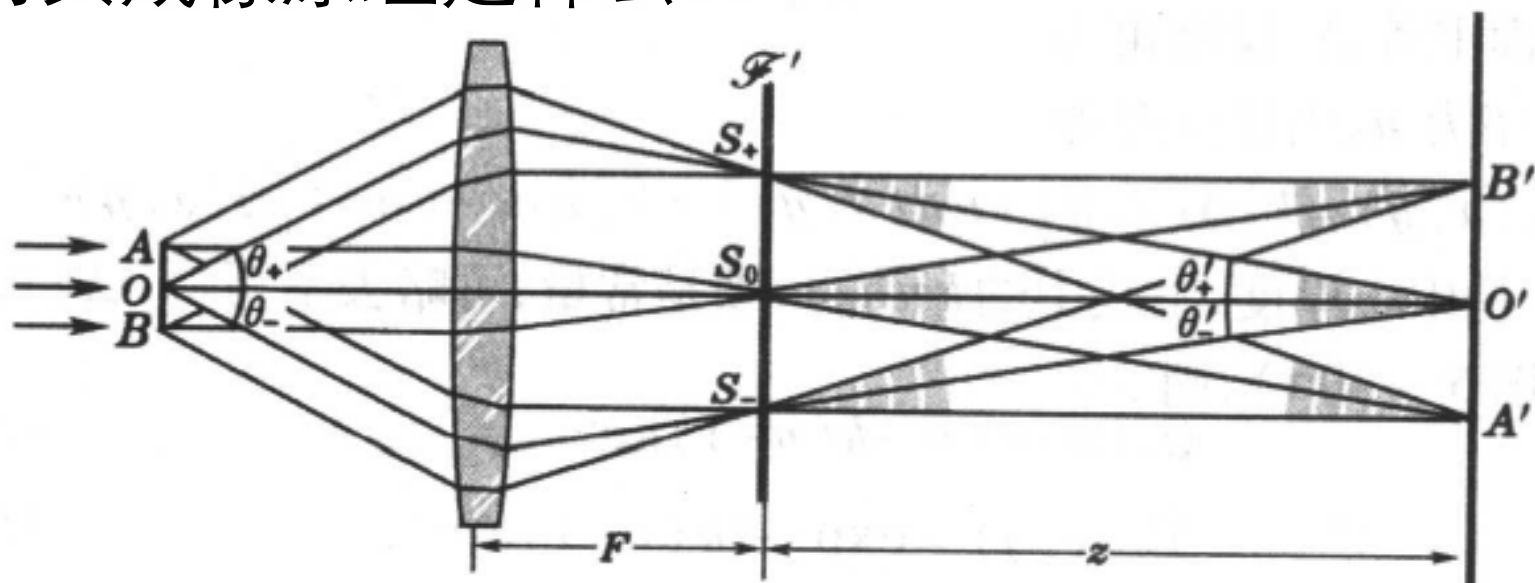
1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

●阿贝成像原理是什么？



物是一系列不同空间频率信息的集合，相干成像过程分两步完成。第一步是相干入射光经物平面 (x,y) 发生夫琅禾费衍射，在透镜后焦面 F' 上形成一系列衍射斑；第二步是干涉，即各衍射斑发出的球面次波在像平面 (x',y') 上相干叠加，像就是干涉场。

1. 信息光学简介

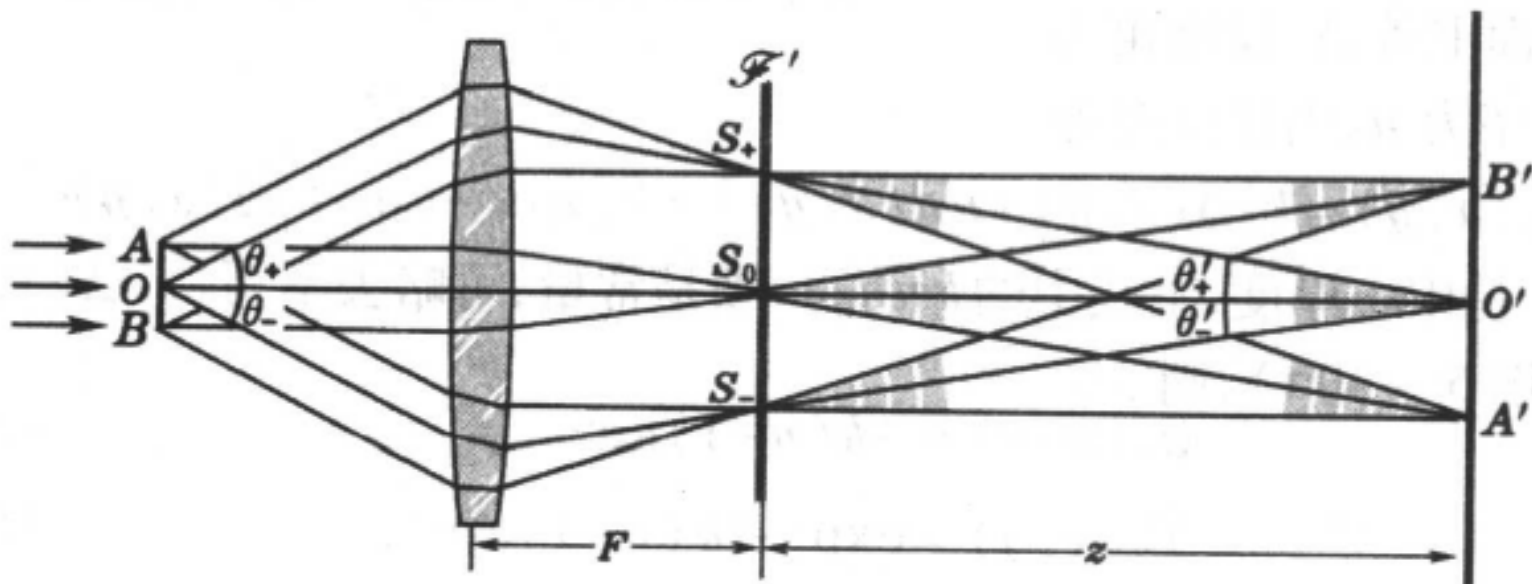
2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

●阿贝成像原理的简要证明

对于任何图像，我们都可以作傅里叶展开，因此最基本的图像是单频信息的正弦光栅。所以我们以正弦光栅为物，来简要论证阿贝成像原理。



1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

●对阿贝成像原理的说明

- 从证明中可以看到，单频的物信息，经阿贝两步成像之后，在像面上得到的依然是单频的像信息，这与几何光学の結果是一致的。
- 物和像的空间频率并不相等，这是几何上缩放的结果，并不影响像的质量。同时也可以看出来物和像在几何上是相似的。
- 影响像的质量的是衬比度，这一点将在思考题中讨论。

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

●阿贝成像原理的意义和价值

- 从频谱的角度去考虑阿贝成像原理。第一步发生夫琅禾费衍射，起“分频”作用。第二步发生干涉，起“合成”的作用。
- 透镜本身就是一个“低通滤波器”。丢失了高频信息的频谱再合成的时候，图像细节会变得模糊，因此要提高成像系统的成像质量，就应该扩大透镜口径。
- 阿贝成像原理的真正价值在于它提供了一种新的频谱的语言来描述信息，启发人们用改变频谱的手段来改造信息。

3.小波变换

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

● 傅里叶变换的局限性

- 一个信号通过傅里叶变换分解成两组正弦和余弦三角函数的线性组合，这些基函数在时间轴上无限扩展，因此傅里叶变换比较适合于较长时间范围内的稳态信号处理。
- 但是，在很多应用领域，人们常常需要处理有限范围内的瞬时信号，例如：语音信号、地震信号和心电图信号。傅里叶变换在任何有限频段上的信息并不足以确定在任意小范围内的函数，所以傅里叶分析将引起高频噪声。
- 傅里叶变换不能反映频谱随时间的变化。

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

● 为什么需要小波变换？

- 小波变换(wavelet transform,简称WT)是一种表达在时域（包括空域）和频域（包括空间频域）都有限的信号的新方法。
- 这种变换对于小范围内的瞬态信号的频谱分析是非常有效的。
- 小波变换可以用光学方法，采用一组光学子波滤波器来实现。这种新方法在 20 世纪 90 年代初提出后，立即引起广泛注意，在信号和图像处理领域得到迅速发展。

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

● 从短时傅里叶变换到小波变换

- 为了有效地提取一个局部信号 $s(t)$ 的信息，我们必须引入一个局部化的变换。所谓局部化，就是被分析的区间要有一定的宽度 Δt ，我们仅对 Δt 及其附近的信息进行处理；还有，被分析区间有一个中心坐标 t_c ，当改变 t_c 时，就可提取不同的信息。
- 为了实现局部化，一个有效的办法是在傅里叶变换中加一个窗函数 $w(t)$

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

●从短时傅里叶变换到小波变换

- 短时傅里叶变换具有局部性，表现在处理过程限制在时间-频率窗内进行，窗的位置是可变的，但窗的大小不能改变。这使短时傅里叶变换在处理一些奇异性的信号时显得无能为力。

- 小波变换的窗口宽度可变就克服了这一缺点。

- 下面举两个具体的变换来说明上面的分析：

盖伯(Gabor)变换——窗口宽度是不能改变的

Morlet小波变换——窗口宽度是可变的

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

● 小波变换

- 定义：小波函数的基函数 $h_{a,b}(t)$ 称为子波。它是由小波母函数 $h(t)$ 以扩缩和位移的方式产生的。

- 基函数为：
$$h_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} h\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

其中，扩缩因子 $a>0$ ，位移因子为 b 。

- 信号 $s(t)$ 的小波变换被定义为希尔伯特空间里的内积：

$$W_s(a,b) = \langle h_{a,b}(t), s(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} h^* \left(\frac{t-b}{a} \right) s(t) dt$$

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

● 小波变换

- 在频域中，小波可表示为：

$$\mathbf{H}_{a,b}(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-j2\pi\nu t) \mathbf{h}_{a,b}(t) dt = \sqrt{a} \exp(-j2\pi\nu b) \mathbf{H}(a\nu)$$

- 所以小波变换也可以表示为信号频谱 $S(\nu)$ 和 $H_{a,b}(\nu)$ 的内积：

$$\mathbf{W}_s(a,b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{H}^*(a\nu) \exp(j2\pi\nu b) \mathbf{S}(\nu) d\nu$$

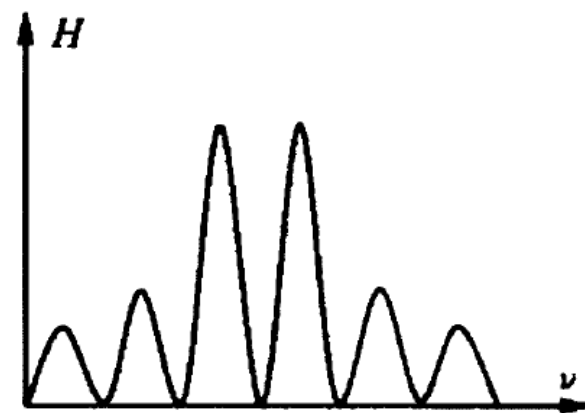
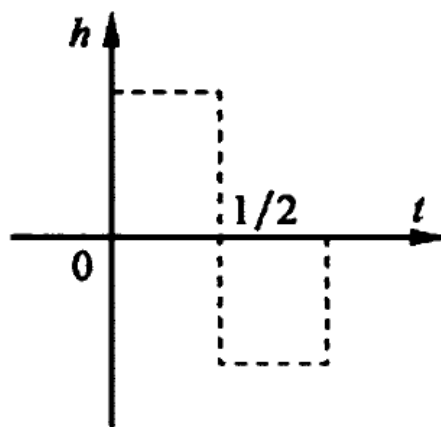
1. 信息光学简介
2. 阿贝成像
3. 小波变换
4. 全息及应用

● 小波函数

- Haar小波——双极性阶跃函数

$$h(t) = \text{rect}\left[2\left(t - \frac{1}{4}\right)\right] - \text{rect}\left[2\left(t - \frac{3}{4}\right)\right]$$

$$H(\nu) = 2j \exp(-j\pi\nu) \frac{1 - \cos(\pi\nu)}{\pi\nu}$$



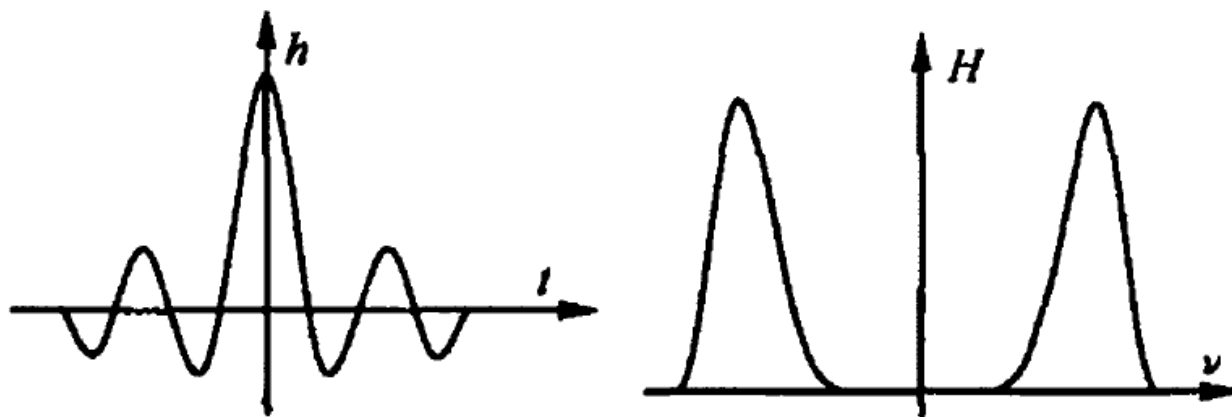
1. 信息光学简介
2. 阿贝成像
3. 小波变换
4. 全息及应用

● 小波函数

- *Morlet*小波——母函数实部为余弦高斯函数

$$h(t) = \exp(j2\pi\nu_0 t) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$$

$$H(\nu) = 2\pi \{ \exp[-2\pi^2(\nu - \nu_0)^2] + \exp[-2\pi^2(\nu + \nu_0)^2] \}$$



1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

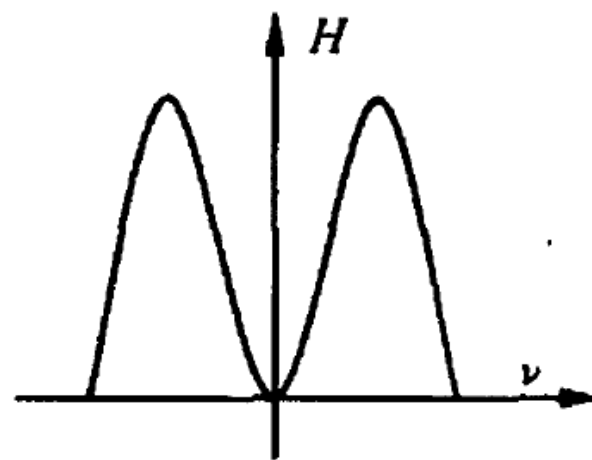
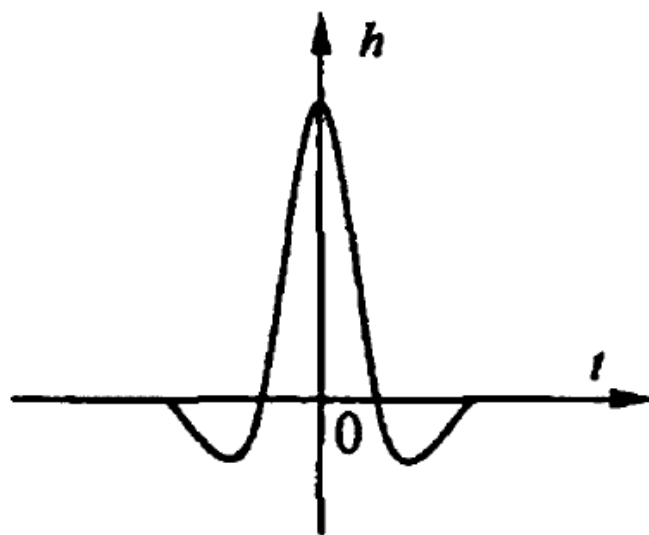
4. 全息及应用

● 小波函数

- *Mexican-hat*小波——母函数为高斯函数二阶导数

$$h(t) = (1 - |t|^2) \exp\left(-\frac{|t|^2}{2}\right)$$

$$H(\nu) = 4\pi^2 \nu^2 \exp(-2\pi \nu^2)$$



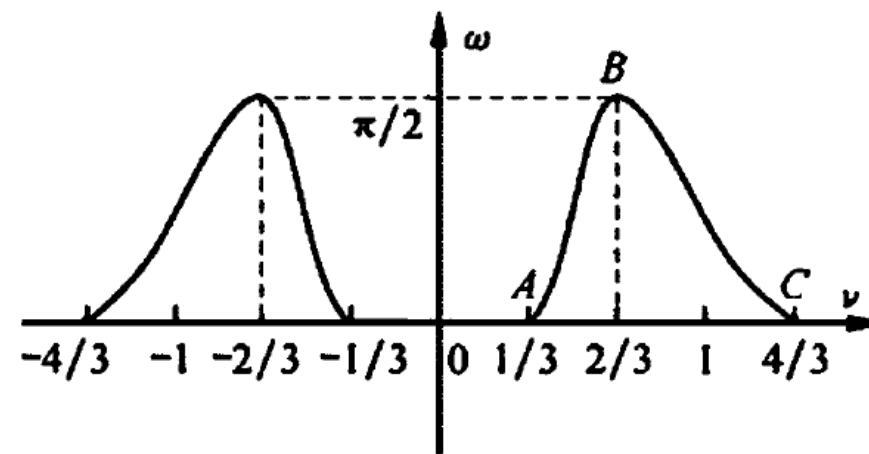
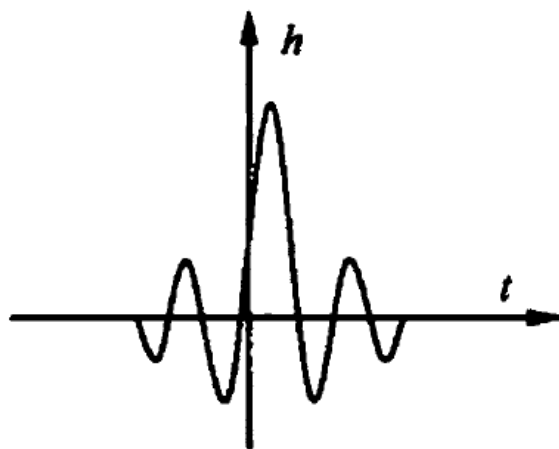
1. 信息光学简介
2. 阿贝成像
3. 小波变换
4. 全息及应用

● 小波函数

- *Meyer*小波——由其傅里叶变换定义

$$\mathbf{H}(\nu) = \exp(-j\pi\nu) \sin[\omega(\nu)]$$

$$\mathbf{h}(t) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \sin[\omega(\nu)] \cos\left[2\pi\left(t - \frac{1}{2}\right)\nu\right] d\nu$$



1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

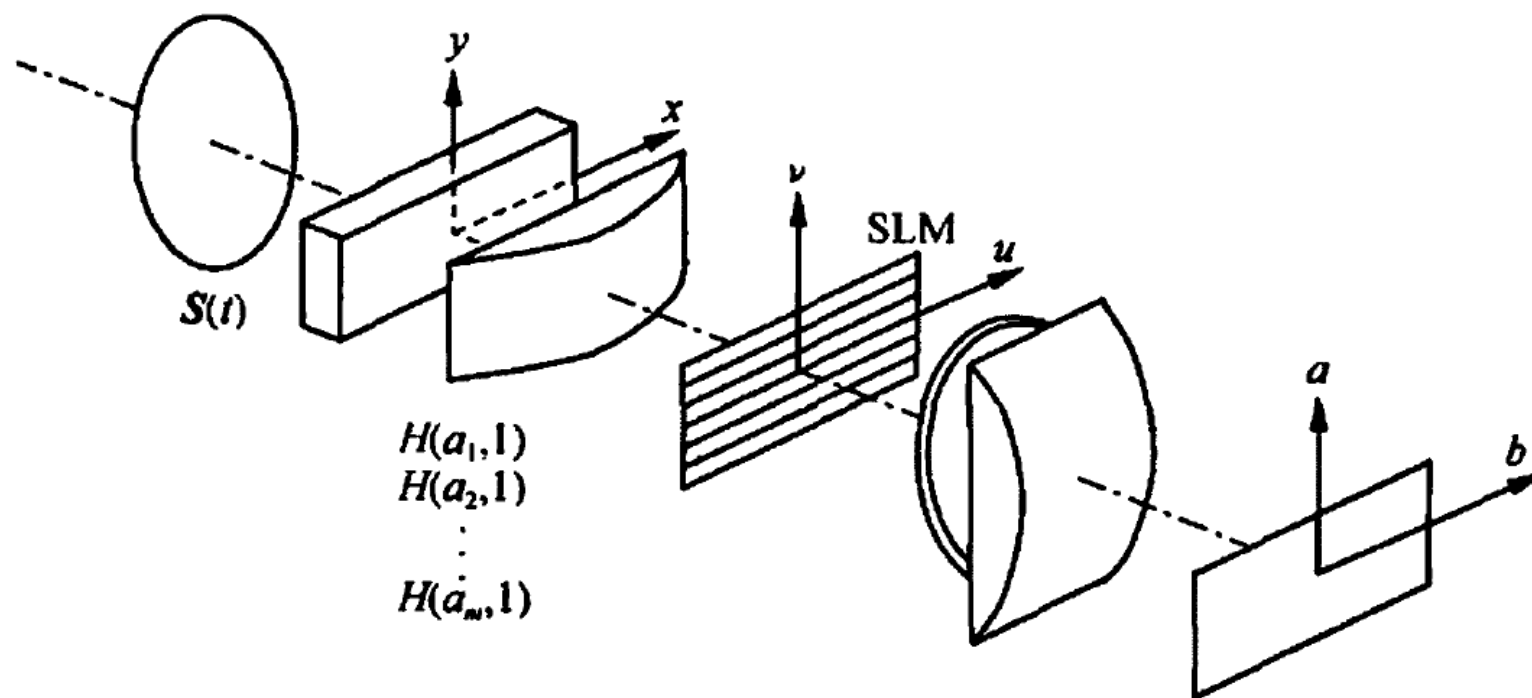
● 光学小波变换

- 光学为我们提供了实时进行小波变换的潜力。
- 光学小波变换在傅里叶平面采用 $H(a\nu)$ 作为小波变换滤波器，根据 $\mathbf{W}_s(a,b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{H}^*(a\nu) \exp(j2\pi\nu b) \mathbf{S}(\nu) d\nu$ ，相关输出中的坐标将是连续的相位因子 b 。
- 对于一个给定的小波变换滤波器，缩放因子 a 是固定的。在多分辨小波变换滤波器中，我们需要一组具有离散的伸缩因子 a 的小波变换滤波器。

1. 信息光学简介
2. 阿贝成像
3. 小波变换
4. 全息及应用

● 光学小波变换

- 一个二维的光学相关器可以实现一个一维的小波变换。



4.全息及应用

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

● 全息的发展

- 1948年，Gabor为了提高电子显微镜的分辨本领，提出全息原理，并开始了全息照相的研究工作。但在20世纪50年代进展缓慢。
- 1960年以后，激光出现，其高度相干性和大强度为全息照相提供理想光源。全息技术迅速发展，并成为一门新的领域。
- 1971年诺贝尔物理学奖——Gabor 因发明全息技术

1. 信息光学简介

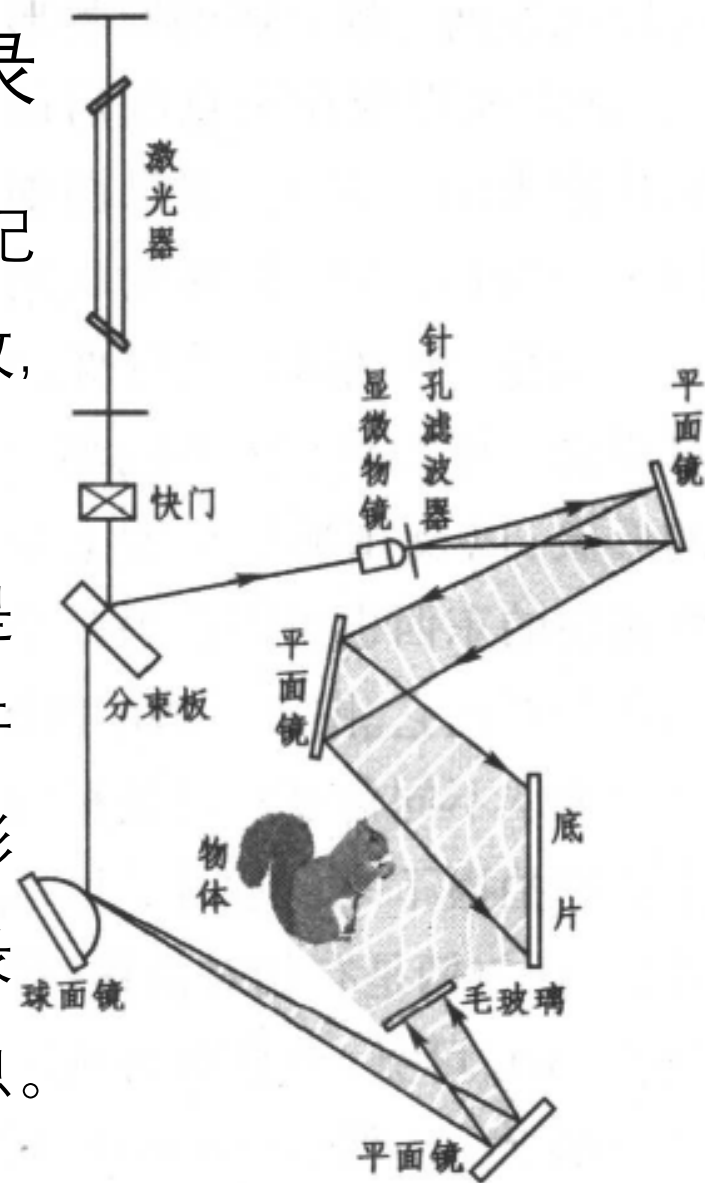
2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

● 全息照相步骤——全息记录

- 参考光束R和物光束O在感光底片（记录介质）上相干叠加，形成干涉条纹，即为全息图。
- 虽然全息底片用肉眼直接观察，只是一张灰蒙蒙的片子，上面有微小的干涉条纹，并不直接显示原物的任何形象。但是全息图利用干涉的方法记录了物光波前上各点的振幅和相位信息。



1. 信息光学简介

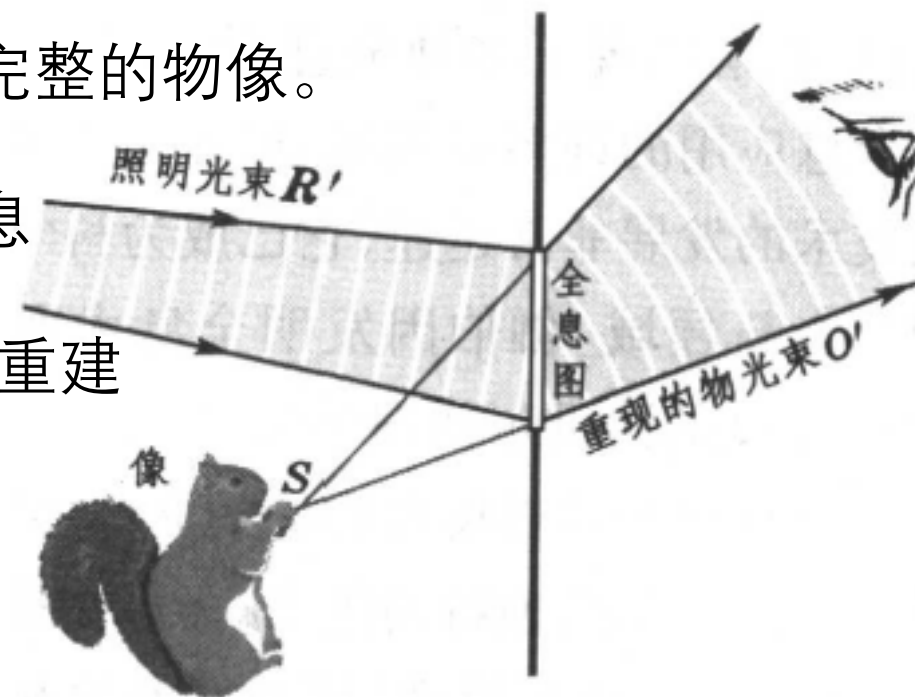
2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

● 全息照相步骤——波前重建

- 用一束与参考光束波长和传播方向相同的照明光束 R' 照射全息图，用眼睛可以观察到一幅立体的原物形象。
- 全息图再现的是一幅三维立体图像，即使全息图不完整，它的一部分也仍然可以成完整的物像。
- 在波前重建的过程中，全息底片是一个复杂光栅，波前重建过程就是衍射过程。



1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

● 全息照相的基本原理——无源空间边值定解

- 菲涅耳-基尔霍夫衍射积分公式：

$$\tilde{U}(P) = \frac{-i}{2\lambda} \oint_{(\Sigma)} (\cos\theta_0 + \cos\theta) \tilde{U}_0(Q) \frac{e^{ikr}}{r} d\Sigma.$$

- 对于波前 Σ 隔开的无源空间，光场的分布由波前上的复振幅分布唯一确定。这就是无源空间的边值定解问题。
- 物光在 Σ 上形成一定波前分布，移去原物，如果使 Σ 上的波前重建，那么无源空间的光场就能再现。

- 1. 信息光学简介
- 2. 阿贝成像
- 3. 小波变换
- 4. 全息及应用

- 波前的全息记录原理

- 光强——振幅信息；相因子——位置信息。
- 参考光波R和物光波O相干叠加，波前Σ上形成干涉条纹。干涉条纹的几何特征反映了相位分布，衬比度反映了振幅大小。

- 我们还有：
$$\begin{aligned} I(Q) &= (\tilde{U}_R^* + \tilde{U}_O^*)(\tilde{U}_R + \tilde{U}_O) \\ &= \tilde{U}_R^* \tilde{U}_R + \tilde{U}_O^* \tilde{U}_O + \tilde{U}_R^* \tilde{U}_O + \tilde{U}_O^* \tilde{U}_R \\ &= A_R^2 + A_O^2 + \tilde{U}_R^* \tilde{U}_O + \tilde{U}_O^* \tilde{U}_R, \end{aligned}$$

- 说明I(Q)可以反映物光波及其共轭波的全部信息。

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

● 波前的全息记录原理

- 将记录介质（感光底片）放在波前 Σ 的位置曝光，把干涉条纹拍摄下来，进行线性冲洗，就得到一张全息图。全息图的屏函数为：

$$\tilde{T}(Q) = T_0 + \beta I(Q) = T_0 + \beta [A_R^2 + A_O^2 + \tilde{U}_R^* \tilde{U}_O + \tilde{U}_O^* \tilde{U}_R]$$

- 事实证明，通过干涉曝光和线性冲洗，我们确实把物光波前和共轭波的全部信息记录下来了。

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

●物光波前的重建原理

- 用照明光波 R' 照明全息底片，从全息图输出的透射波前为

$$\begin{aligned}\tilde{U}_T &= \tilde{U}_R' \tilde{T} = \tilde{U}_R' (T_0 + \beta A_R^2 + \beta A_O^2) + \beta \tilde{U}_R' \tilde{U}_R^* \tilde{U}_O + \beta \tilde{U}_R' \tilde{U}_O^* \tilde{U}_R \\ &= \tilde{U}_R' (T_0 + \beta A_R^2 + \beta A_O^2) + \beta A_R' A_R \left\{ \begin{aligned} &\tilde{U}_O \exp[i(\varphi_R' - \varphi_R)] \\ &+ \tilde{U}_O^* \exp[i(\varphi_R' + \varphi_R)] \end{aligned} \right\}.\end{aligned}$$

- 全息衍射场中有3列波：0级——几何光学透射波，1级和-1级——衍射波。实际要设法使他们在空间上分离，互不干扰，以利于观测。

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

● 全息技术的应用

- 全息电影和全息电视
- 全息显微技术
- 全息干涉技术
- 红外、微波及超声全息照相技术
- 全息照相存储技术

1. 信息光学简介

2. 阿贝成像

3. 小波变换

4. 全息及应用

● 计算全息显示

- 计算全息显示利用计算机模拟光学全息图的记录过程。
- 它可以全面的记录光波的振幅与相位，且噪声低，重复性高，可记录任何甚至不存在的物体的全息图。
- 使用空间光调制器（SLM）记录全息图，令实时动态计算全息显示成为可能。
- 因此，计算全息显示已经成为近些年的研究热点。

思考题

- 在阿贝成像原理的证明中，如果光栅屏函数由 $t=1+\cos(2\pi fx)$ 变为 $t=t_1+t_2\cos(2\pi fx)$ ，物场和像场的衬比度满足什么关系？