普通高等教育"十一五"国家级规划教材

(第2版)

信息光学理论与应用

王仕璠　编著

北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

普通高等教育"十一五"国家级规划教材

信息光学理论与应用

(第2版)

王仕璠 编著

北京邮电大学出版社
·北京·

内容简介

本书系统地介绍了信息光学的基础理论及相关的应用。全书共10章，内容涉及二维傅里叶分析、标量衍射理论、光学成像系统的频率特性、部分相干理论、光学全息照相、空间滤波、相干光学处理、非相干光学处理、信息光学在计量学和光通信中的应用等。

本书内容丰富，选材新颖，既系统地介绍基础理论，又同时兼顾理论和技术的当前发展，并强调理论与应用的结合。第2版较第1版作了许多修改和补充。书中精选了近200个例题、思考题和习题，并给出了全部习题的详细解答，便于读者加深对正文的理解。

本书读者对象为光学、光学工程、光电子技术、光信息科学与技术、应用物理、精密仪器等专业的高年级本科生和研究生，也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

信息光学理论与应用/王仕璠编著．—2版．—北京：北京邮电大学出版社，2009

ISBN 978-7-5635-1896-8

Ⅰ.信…　Ⅱ.①王…　Ⅲ.信息光学　Ⅳ.O438

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第197706号

书　　名：信息光学理论与应用
作　　者：王仕璠
责任编辑：李欣一　陈岚岚
出版发行：北京邮电大学出版社
社　　址：北京市海淀区西土城路10号(邮编：100876)
发 行 部：电话：62282185　传真：62283578
E-mail：publish@bupt.edu.cn
经　　销：各地新华书店
印　　刷：北京忠信诚胶印厂
开　　本：787 mm×1 092 mm　1/16
印　　张：23
字　　数：604千字
印　　数：1—5 000册
版　　次：2004年3月第1版　2009年2月第2版　2009年2月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-1896-8　　定　价：38.00元

第 2 版前言

本书第 2 版和第 1 版相较，有了很多修改。主要的修改如下：

1. 对原书各章作了全面的校订，使文字更加流畅、概念叙说更加准确、数学推演更加严谨，同时为便于教师与学生使用本教材，在各章末增加了“本章重点”和“思考题”，与此相配合，精选了数十道实用的例题作解题示范；重新审订了各章的习题，并给出了全部习题的详细答案。

2. 在相关章节，增写了信息光学在工业和科技领域中的应用，以便使理论与应用更紧密结合，同时开拓学生视野。

3. 将原书中第 9 章至第 11 章共 3 章压缩成一章（即现在的第 9 章），重点介绍信息光学用于计量学领域时的数据处理方法，原书中有关实验方面的一些描述，因另有专门的实验教材出版（见本人主编的《现代光学实验教程》，北京邮电大学出版社，2004），就从本书中删去了。

4. 新增了第 10 章“信息光学在光通信中的应用”。这是因为近 10 年来，光纤通信和相应元器件的发展极大地促进了信息光学与光通信技术的结合。光纤布喇格光栅和阵列波导光栅等的出现使全光网通信成为可能。鉴于空间光调制器在光学信息处理和光通信中日益广泛的应用，在第 7 章还专门增写了“空间光调制器”一节。全部新增和校订的内容约占原书1/3的篇幅。

衷心感谢北京邮电大学出版社对本书再版和申报“十一五”国家级规划教材给予的支持；衷心感谢采用本书作教材的各兄弟高校的同行们，是你们的支持才使本书得以再版；衷心感谢多年来听我讲授过“信息光学”课的学生们，是你们孜孜不倦的求知精神，激发了我的教学和写作热情；还要衷心感谢电子科技大学物理电子学院刘艺副教授，他为本书电子教案（PPT）的打印和绘图付出了辛勤劳动。

由于作者水平所限，书中缺点和错误在所难免，恳切期望使用本教材的读者批评指正。

作者

目　　录

第1章　二维傅里叶分析

自20世纪40年代后期起，由于通信理论中“系统”的观点和数学上的傅里叶分析（频谱分析）方法被引入光学，更新了传统光学的概念，丰富了光学学科的内容，并形成现代光学的一个重要分支——傅里叶光学(Fourier Optics)。

作为系统，无论是通信系统还是光学系统，它们都是用来把收集到的信息转换成人们所需要的输出信息，只不过通信系统传递和转换的信息是随时间变化的函数（例如被调制的电压和电流波形），而光学系统传递和转换的信息（光场的复振幅分布或光强度分布）则是随空间变化的函数。在数学上，这两者之间没有实质性的差别。近年来，随着光纤通信和相应元器件（例如半导体激光器和接收器等）的出现，进一步促进了光学与通信理论和技术的结合。傅里叶光学促进了图像科学、应用光学、光纤通信和光电子学的发展，可以认为它是光学、光电子学、信息论和通信理论的交叉科学，也是信息光学在各种应用领域中的数理基础。

本章的重点是介绍傅里叶光学中广泛用到的一些数学知识。在内容的选择和数学概念的引入上，密切结合光学现象而不拘泥于数学上的系统性和严密性，希望这样会有利于读者较快地掌握和运用这些数学工具来处理问题，从而避免由于烦琐的数学论证和运算而淡化傅里叶光学内容的物理实质和实用性。

1.1　光学中常用的几种非初等函数

在傅里叶光学中，有一些广泛使用的非初等函数被用来描述各种物理量。掌握它们的定义，熟悉它们的图像，常常会对分析、理解诸多光学现象带来很多方便。为此，首先介绍它们的定义和性质，并给它们各自指定专门的符号，为以后的讨论节省许多篇幅。

1.1.1　矩形函数

一维矩形函数(Rectangle Function)定义为：

$$\mathrm{rect}\left(\frac{x}{a}\right)=\begin{cases}1 & |x|\leqslant a/2\\ 0 & \text{其他}\end{cases}\tag{1.1.1}$$

式中，$a>0$，其函数图形如图1.1.1所示。

该函数以坐标原点为中心，在宽度为 a 的区间内其值等于1，其他地方处处为0。

在时间域中，当用 x 代表时间变量时，光学中可以用一维矩形函数来描写照相机快门，定义式(1.1.1)中的 a 便是曝光时间；在空间域中，可以用该函数来描述无限大不透明屏上单缝的透过率，故一维矩形函数也称为门函数(Gating Function)。同时，它与某函数相乘后，可限制该函数自变量的取值范围，起到截取函数的作用。例如乘积 $\cos x\cdot\mathrm{rect}(x/a)$ 表示余弦函数只出现在区间 $(-a/2,+a/2)$ 上。

二维矩形函数的定义为：

$$\mathrm{rect}\left(\frac{x}{a},\frac{y}{b}\right)=\mathrm{rect}\left(\frac{x}{a}\right)\cdot\mathrm{rect}\left(\frac{y}{b}\right)=\begin{cases}1 & |x|\leqslant\dfrac{a}{2},|y|\leqslant\dfrac{b}{2}\\ 0 & \text{其他}\end{cases}\tag{1.1.2}$$

式中，$a>0$，$b>0$。

该函数可视为二个一维矩形函数的乘积，它在 xOy 平面上以原点为中心的 $a\times b$ 矩形区域内，函数值为1，其他地方处处等于0，如图1.1.2所示。二维矩形函数可用来描述无限大不透明屏上矩形孔的透过率。

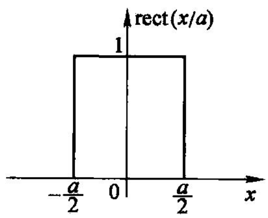


图1.1.1　一维矩形函数

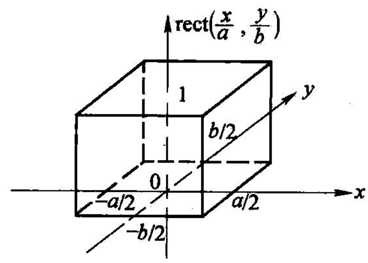


图1.1.2　二维矩形函数

1.1.2　sinc 函数

一维sinc函数(sinc Function)定义为：

$$\mathrm{sinc}\left(\frac{x}{a}\right)=\frac{\sin(\pi x/a)}{\pi x/a}\tag{1.1.3}$$

式中，$a>0$。

该函数在原点处有最大值1，而在 $x=\pm na(n=1,2,3,\cdots)$ 处的值等于0，其函数图形如图1.1.3所示。原点两侧第一级零点之间的宽度(称为sinc函数的主瓣宽度，Mainlobe Width)为 $2a$，并且它的面积(包括正波瓣和负波瓣)刚好等于 a。

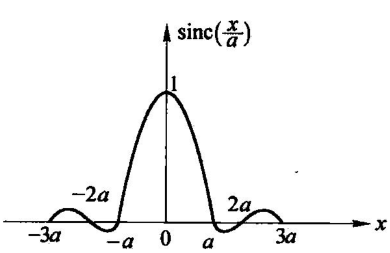


图1.1.3　一维sinc函数

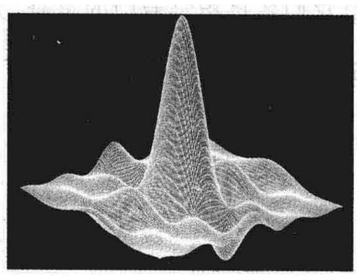


图1.1.4　二维sinc函数

二维 sinc 函数定义为：

$$\operatorname{sinc}\left(\frac{x}{a},\frac{y}{b}\right)=\operatorname{sinc}\left(\frac{x}{a}\right)\operatorname{sinc}\left(\frac{y}{b}\right) \tag{1.1.4}$$

式中，$a>0$，$b>0$。

该函数可视为二个一维 sinc 函数的乘积，零点位置在$(\pm ma,\pm nb)$，m、n 均为正整数，其函数图形如图 1.1.4 所示。

由基础光学中知道，sinc 函数可用来分别描述单缝（一维情形）和矩孔（二维情形）的夫琅和费衍射的振幅分布，其平方表示衍射图样。由于 sinc 函数与矩形函数（单缝、矩孔的透过率）之间的这种紧密联系，致使它们在傅里叶光学中经常被用到。

1.1.3 阶跃函数

一维阶跃函数（Step Function）定义为：

$$\operatorname{step}\left(\frac{x}{a}\right)=\begin{cases}0 & \dfrac{x}{a}<0\\[2mm] \dfrac{1}{2} & \dfrac{x}{a}=0\\[2mm] 1 & \dfrac{x}{a}>0\end{cases} \tag{1.1.5}$$

式中，$a>0$，其函数图形如图 1.1.5 所示。

该函数在原点 $x=0$ 处有一个间断点，取值为$\frac{1}{2}$（规定它等于该间断点处左、右极限的平均值）。这种定义方式只是为了与本节后面的符号函数相呼应，对实际计算来说，这种间断点处的情况无关紧要，通常无须考虑。此外，讨论这种函数的宽度和面积是没有意义的。

将一维阶跃函数与某函数相乘时，在 $x>0$ 的部分，乘积等于该函数，在 $x<0$ 的部分，乘积恒等于 0，因而一维阶跃函数的作用如同一个“开关”，可在某点“开启”或“关闭”另一个函数。例如乘积 $\cos(2\pi x)\cdot\operatorname{step}(x)$，对 $x<0$ 恒等于 0，而对 $x>0$ 则是 $\cos(2\pi x)$。

二维阶跃函数定义为：

$$f(x,y)=\operatorname{step}(x) \tag{1.1.6}$$

上式表明，这里定义的二维阶跃函数在 y 方向上等于常数，而在 x 方向上等同于一维阶跃函数，其函数图形如图 1.1.6 所示。这种函数可用来描述光学直边（或刀口）的透过率。

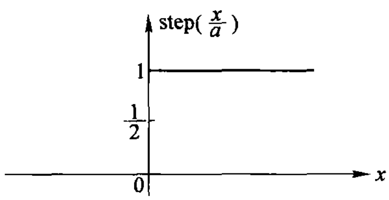


图 1.1.5　一维阶跃函数

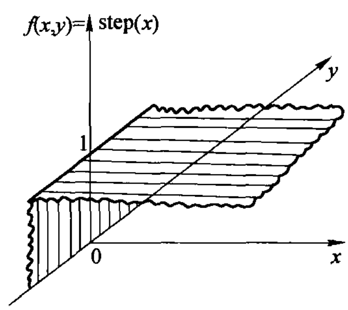


图 1.1.6　二维阶跃函数

1.1.4 符号函数

一维符号函数（Signum Function）定义为：

$$\mathrm{sgn}\left(\frac{x}{a}\right)=\begin{cases} +1 & \frac{x}{a}>0 \\ 0 & \frac{x}{a}=0 \\ -1 & \frac{x}{a}<0 \end{cases} \tag{1.1.7}$$

其函数图形如图 1.1.7 所示。

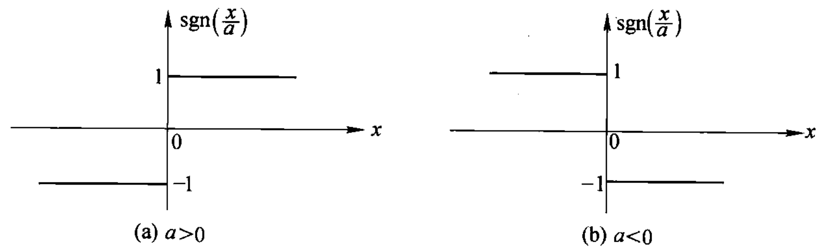


图 1.1.7　符号函数

符号函数与一维阶跃函数之间存在下列关系式：

$$\mathrm{sgn}(x)=2\ \mathrm{step}(x)-1 \tag{1.1.8}$$

和阶跃函数的情况一样，宽度和面积的概念是没有意义的。而 a 的正负仅仅决定函数的取向。

符号函数 sgn(x)与某函数相乘，可使该函数在某点的极性(正负号)发生翻转。例如某孔径的一半嵌有 π 位相板，则可利用符号函数来描述此孔径的复振幅透过率。

1.1.5　三角形函数

一维三角形函数(Triangle Function)定义为：

$$\Lambda\left(\frac{x}{a}\right)=\begin{cases} 1-\frac{|x|}{a} & \frac{|x|}{a}<1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{1.1.9}$$

式中，$a>0$，函数图形如图 1.1.8(a)所示。

该函数图形可视为底边宽度为 $2a$、高度为 1 的三角形。

二维三角形函数定义为：

$$\Lambda\left(\frac{x}{a},\frac{y}{b}\right)=\Lambda\left(\frac{x}{a}\right)\Lambda\left(\frac{y}{b}\right)=\begin{cases} \left(1-\frac{|x|}{a}\right)\left(1-\frac{|y|}{b}\right) & \frac{|x|}{a},\frac{|y|}{b}<1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{1.1.10}$$

式中，$a>0$，$b>0$。

该函数可视为两个一维三角形函数的乘积，其函数图形如图 1.1.8(b)所示。

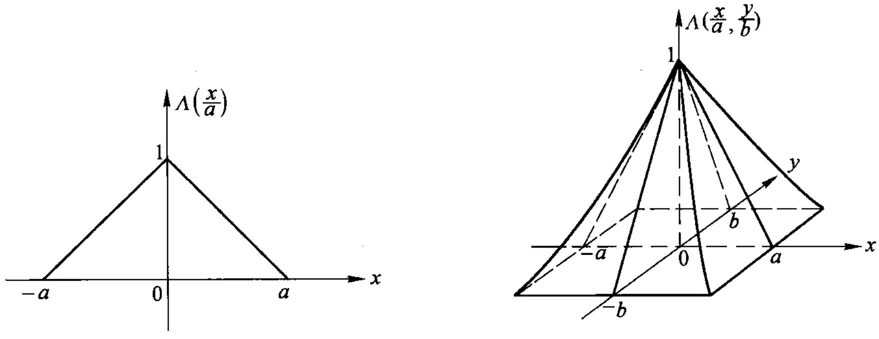
二维三角形函数可用来表示一个光瞳为矩形的非相干成像系统的光学传递函数(详见第 3 章)。

1.1.6　高斯函数

一维高斯函数(Gaussian Function)定义为：

$$\mathrm{Gauss}\left(\frac{x}{a}\right)=\mathrm{e}^{-\pi\left(\frac{x}{a}\right)^2} \tag{1.1.11}$$

式中，$a>0$。



(a) 一维情形　　(b) 二维情形

图 1.1.8　三角形函数

该函数图形如图 1.1.9(a)所示，指数中加入因子 π，是为了使高斯函数曲线的中央高度具有最大值 1，曲线下的面积等于 a。

二维高斯函数定义为：

$$\mathrm{Gauss}\left(\frac{x}{a},\frac{y}{b}\right)=\exp\left\{-\pi\left[\left(\frac{x}{a}\right)^2+\left(\frac{y}{b}\right)^2\right]\right\} \tag{1.1.12}$$

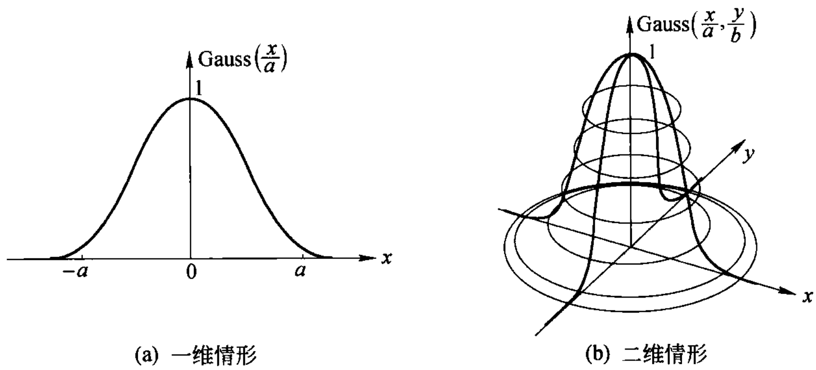
式中，$a>0$，$b>0$。

该函数图形如图 1.1.9(b)所示，函数曲线下的体积等于 ab。若 $a=b=1$，则二维高斯函数可表示成：

$$\mathrm{Gauss}(x,y)=\exp[-\pi(x^2+y^2)] \tag{1.1.13}$$

若用极坐标表示，则令 $r=\sqrt{x^2+y^2}$，便有：

$$\mathrm{Gauss}(r)=\mathrm{e}^{-\pi r^2} \tag{1.1.14}$$



(a) 一维情形　　(b) 二维情形

图 1.1.9　高斯函数

高斯函数具有下列重要性质：

① 它是光滑函数，且其各阶导数都是连续的；

② 高斯函数的傅里叶变换也是高斯函数。

高斯函数在统计学领域内经常遇到。在光学领域中，它常用来描述激光器发出的高斯光束，有时也用于光学信息处理中的“切趾术”(详见第 8 章)。