

光全息 数字水印技术

GUANGQUANXI SHUZI SHUIYIN JISHU

孙刘杰 王文举 © 著



文化发展出版社
Cultural Development Press

光全息 数字水印技术

GUANGQUANXI SHUZI SHUIYIN JISHU

孙刘杰 王文举 © 著



文化发展出版社
Cultural Development Press

内容提要

本书是上海理工大学孙刘杰博士教授团队在光学专家庄松林院士的指导下,近十年来在光全息水印技术领域研究成果的总结,全书分为六章,从概念、理论、技术和应用等角度对数字水印与光全息水印技术进行了全面系统的阐述。本书内容先进,具有重要的理论和应用价值,在数字媒体的版权保护、印刷图像的认证和包装防伪等方面具有广泛的应用前景。

图书在版编目(CIP)数据

光全息数字水印技术/孙刘杰,王文举著. —北京:文化发展出版社,2016.11

ISBN 978-7-5142-1526-7

I. ①光… II. ①孙… III. ①电子计算机—密码术 IV. ①TP309.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第237914号

光全息数字水印技术

孙刘杰 王文举 著

责任编辑:魏欣

责任校对:岳智勇

责任印制:邓辉明

责任设计:侯铮

出版发行:文化发展出版社(北京市翠微路2号 邮编:100036)

网 址: www.wenhua fazhan.com www.printhome.com

经 销:各地新华书店

印 刷:北京建宏印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:240千字

印 张:13.25

印 次:2016年11月第1版 2017年8月第2次印刷

定 价:39.00元

I S B N : 978-7-5142-1526-7

◆ 如发现任何质量问题请与我社发行部联系。发行部电话:010-88275710

前言

Preface

本书是光学全息水印技术的专论，是在光学专家庄松林院士的指导下，上海理工大学孙刘杰博士教授团队十余年的研究成果的总结。成果具有技术先进性，同时具有重要的理论和应用价值，在数字媒体的版权保护、印刷图像的认证和包装防伪等方面有广泛的应用前景。本书从理论、技术和应用等角度全面论述光学全息水印技术，推动光全息水印技术的推广和应用。内容包括：（1）光学全息技术；（2）光学全息加密解密技术；（3）数字水印技术概论；（4）光全息空间域水印技术；（5）光全息变换域水印技术；（6）彩色图像光全息水印技术；（7）三维模型光全息水印技术等。本书对数字水印的研究和应用具有重要的参考价值，也可以作为“数字水印技术”课程的教材或参考书。

数字水印技术是一种保护数字作品版权的技术。数字水印利用人类的听觉、视觉系统的特点，在声音、图像和视频等数字作品中加入一定的信息，使人们很难分辨加水印后的数字作品与原始数字作品的区别，而通过专门的检测方法又能提取所加信息，以此证明原创作者对数字媒体的版权。数字水印技术是一种特殊的信息隐藏技术，用于证明数字作品的真实可靠性、跟踪盗版行为或者提供产品的附加信息。其中的秘密信息可以是版权标志、用户序列号或者产品相关信息。

光全息数字水印技术是指通过数字全息术生成水印，并嵌入到原始作品中，作为版权保护、真伪鉴别、产品侦测与跟踪等手段的一种水印技术。由于全息术的诸多优点，如部分可以恢复整体、三维显示、强位压缩和抗干扰性能等，光全息水印技术成为研究和应用的热点。

全书共分为6章，第1章讲述光全息理论与全息加密解密技术，从理论推导和仿真实验分析两个方面，详细分析讨论了加密全息图像的性质，得出加密全息

图像具有能够恢复原始信息的能力、强位压缩性能、强抗剪切能力、有一定的抗随机干扰能力、具有抗分析攻击的能力，为加密全息图像的应用提供了强有力的理论依据。第2章全面论述了数字水印与光全息水印技术，从理论分析和仿真实验两个方面，证明了加密全息水印技术可以作为数字作品版权保护的重要手段，具有不可见性、鲁棒性和安全性。其嵌入过程是通过简单的加法规则实现的，可以由数字计算方法和光学方法实现。第3章论述抗几何攻击全息水印技术，在变换域上进行水印嵌入，并结合傅里叶-梅林变换、特征点匹配的矫正算法、SIFT和SSIM变换算法，实现了全息水印的抗几何变换。第4章重点论述了自适应全息水印技术，结合人眼视觉系统的敏感特性，提出了基于DWT变换的图像内容自适应、K-means聚类的图像特征自适应、SIFT算法的图像区域自适应、HVS和Contourlet变换的自适应等自适应全息水印，提高了全息水印质量。第5章讲述基于光全息标识及水印的印刷品防伪技术，重点讲述CMYK颜色空间的变换域全息水印算法，并在印铁包装防伪中得到应用；第6章讲述基于光全息技术的三维模型水印技术，面向三角网格、点云三维模型提出了小波变换的三维模型加密全息盲水印算法、基于离散余弦变换的点云三维模型全息盲水印算法。由于三维模型的获取、加工处理更加复杂，投入的人力、物力和财力更多，凝聚了更多的智力因素，三维模型全息水印技术的研究具有更高的应用价值。

全息水印技术及其应用研究得到了以下项目基金资助：上海市重点学科基金——印刷出版（P0501）和光学工程（T0501）；上海市教委重点研究项目——三维模型数字全息水印技术研究（13ZZ111）；上海市宝山区科委项目——数字水印技术在印铁包装防伪中的应用研究（CXY-2012-16）；国家数字版权保护技术重大研发工程项目——光全息水印技术应用研究（GXTC-CZ-1015004/15-3）；国家新闻出版总署“数字印刷工程研究中心”开放基金项目——印刷品防伪标识技术研究；上海市教委085工程项目——印刷光学防伪技术重点实验室。参与全息水印技术研究的人员除著作者外，还有郑继红、张雷洪、李孟涛、徐卓、王子煜、李晨璐、周中原、刘宁宁、秦杨、于海娇、李毓彬、包观笑、商静静等，徐逸、王勇、龚一珉三位研究生在文字编辑和排版等方面做了大量工作，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中错误和疏漏在所难免，恳请读者批评指正。

著 者

2016年10月

目 录

Contents

第 1 章 光全息理论与全息加密解密技术	1
1.1 光全息理论概述	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 全息术原理	2
1.1.3 傅里叶变换全息图	4
1.1.4 菲涅耳全息图	7
1.2 傅里叶全息加密技术	9
1.2.1 双随机相位调制技术	9
1.2.2 加密图像同轴全息技术	10
1.2.3 加密相位同轴全息技术	18
1.2.4 加密傅里叶全息技术	22
1.3 菲涅耳全息加密技术	26
1.3.1 菲涅耳衍射调制加密技术	26
1.3.2 加密同轴菲涅耳全息图像	29
1.3.3 加密菲涅耳衍射离轴全息图像	34
1.4 小结	35
参考文献	36

第 2 章 数字水印与光全息水印技术	37
2.1 数字水印技术概述	37
2.1.1 数字水印概念	37
2.1.2 数字水印的基本框架模型	39
2.1.3 数字水印分类	42
2.2 数字水印技术主要性能	44
2.2.1 不可见性 (invisibility)	44
2.2.2 安全性 (security)	45
2.2.3 鲁棒性 (robustness)	46
2.3 光全息水印技术	46
2.4 加密全息水印技术	48
2.4.1 加密全息水印生成嵌入和提取	48
2.4.2 加密全息图像水印盲提取技术	50
2.5 加密全息水印仿真结果和性能分析	55
2.5.1 加密图像同轴全息水印技术	55
2.5.2 加密傅里叶全息水印技术	60
2.6 小结	61
参考文献	61
第 3 章 抗几何攻击全息水印防伪技术	62
3.1 基于变换域的全息水印算法	63
3.1.1 基本理论与技术	63
3.1.2 水印的嵌入和提取方法	66
3.1.3 实验结果与分析	67
3.1.4 小结	68
3.2 基于傅里叶-梅林变换的水印算法	69
3.2.1 傅里叶-梅林变换	69
3.2.2 水印的嵌入和提取技术	72
3.2.3 实验结果与分析	73

3.2.4	小结	75
3.3	基于特征点匹配的矫正水印算法	76
3.3.1	基于特征点匹配的矫正方法	76
3.3.2	水印的嵌入和提取技术	80
3.3.3	实验结果与分析	81
3.3.4	小结	84
3.4	面向打印扫描的抗旋转全息水印算法	84
3.4.1	DCT全息水印	84
3.4.2	旋转校正	86
3.4.3	实验结果与分析	88
3.4.4	小结	89
3.5	抗任意角度旋转的全息水印算法	90
3.5.1	图像结构相似度SSIM	90
3.5.2	实验结果与分析	92
3.5.3	小结	95
3.6	基于SIFT和SSIM变换的抗旋转全息水印算法	95
3.6.1	基于SIFT的尺度校正	96
3.6.2	基于结构相似度 (SSIM) 的旋转校正	96
3.6.3	实验结果与分析	98
3.6.4	小结	100
	参考文献	101

第 4 章 自适应全息水印技术 104

4.1	人眼视觉系统的敏感特性分析	104
4.1.1	亮度敏感性	105
4.1.2	频率敏感性	105
4.1.3	边缘和纹理敏感性	106
4.2	基于DWT变换的图像内容自适应水印技术	106
4.2.1	水印嵌入位置和强度计算	106
4.2.2	水印嵌入算法	109

4.2.3	水印提取算法	110
4.2.4	仿真实验与性能分析	110
4.2.5	小结	117
4.3	基于SIFT算法的图像区域自适应水印技术	118
4.3.1	SIFT算法分析	118
4.3.2	图像区域自适应的数字全息水印算法	120
4.3.3	小结	127
4.4	基于K-means聚类的图像特征自适应水印技术	127
4.4.1	K-means图像处理技术	127
4.4.2	基于图像特征区域的全息水印算法	129
4.4.3	小结	134
4.5	基于HVS和Contourlet变换的自适应水印技术	134
4.5.1	Contourlet变换	134
4.5.2	基于HVS的Contourlet变换域掩盖模型构建	135
4.5.3	水印嵌入算法	137
4.5.4	水印提取算法	138
4.5.5	仿真实验与性能分析	138
4.5.6	小结	142
	参考文献	143

第5章 基于光全息标识及水印的印刷品防伪技术

144

5.1	印刷及印刷防伪技术概述	144
5.1.1	印刷技术	144
5.1.2	印刷防伪技术	145
5.2	加密全息标识印刷和认证技术	146
5.2.1	加密全息标识生成、印制和认证方法	146
5.2.2	加密全息标识防伪技术	147
5.2.3	加密全息防伪标识尺寸和畸变校正问题讨论	151

5.3	加密全息水印印刷和认证技术	153
5.3.1	加密傅里叶全息水印印刷和认证	153
5.3.2	双随机相位加密同轴数字全息水印印刷和认证	154
5.3.3	离轴菲涅耳变换加密图像全息水印印刷和认证	155
5.4	基于CMYK颜色空间的变换域全息水印算法及应用研究	157
5.4.1	基于CMYK颜色空间的变换域全息水印算法理论分析	157
5.4.2	基于CMYK颜色空间变换域全息水印的嵌入与提取算法	160
5.4.3	仿真实验研究	161
5.4.4	基于CMYK颜色空间的变换域全息水印算法在金属防伪 包装上的应用	162
5.5	数字水印技术在印铁包装防伪中的应用研究	165
5.5.1	印铁包装防伪中的关键技术	165
5.5.2	基于CMYK颜色空间的光全息水印算法解决 同步问题的理论分析	166
5.5.3	傅里叶-梅林变换具有几何不变性的原理分析	168
5.5.4	印铁包装防伪中水印的嵌入与提取算法	169
	参考文献	170

第 6 章 三维模型全息水印算法研究

6.1	引言	171
6.2	加密光全息的三维模型空域数字水印算法	174
6.2.1	空间域三维网格模型水印的基本框架	174
6.2.2	水印的嵌入与提取算法	175
6.2.3	水印的增强与检测	178
6.2.4	实验结果与分析	181
6.3	小波变换的三维模型加密全息盲水印算法	186
6.3.1	变换域三维网格模型水印的基本框架	186
6.3.2	基于DWT的三维网格模型加密全息盲水印	187
6.3.3	实验结果与分析	191

6.4 基于离散余弦变换的三维点云模型全息盲水印算法.....	194
6.4.1 水印的嵌入	194
6.4.2 水印提取算法	195
6.4.3 实验结果.....	196
参考文献.....	199

第1章

光全息理论与全息加密解密技术

1.1 光全息理论概述

1.1.1 引言

1948年，Gabor提出了一种新的两步无透镜成像法，即一个合适的相干参考波与一个物体衍射的光波同时存在，此衍射波的振幅和相位的信息就都被记录下来。Gabor证明了，尽管摄影胶片只对强度有响应，通过这种方法记录下来的干涉图像，可以得到原来物体的像，记录的干涉图像就称为全息图。自Gabor提出全息术以来，特别是1960年第一台激光器问世以来，全息技术得到了快速发展，开发出了全息显微、全息检测、全息显示、全息模压、全息元件等技术，使全息图在医学、计量、信息、文字图像、包装装饰、商品防伪、海洋学、军事等领域都得到了广泛的应用。

本书涉及全息加密和全息水印技术及应用，全息加密和全息水印技术是建立在全息术和数字全息技术的基础上，因此，本章一开始就对全息技术进行一个简单的介绍，对全息加密和全息水印中所使用的傅里叶变换全息图和菲涅耳变换全息图的记录和重建过程进行了分析；在此基础上，重点介绍了光学调制加密技术、加密全息技术和解密技术，并对加密全息图像进行了压缩和抗干扰分析；针对全息加密技术的特点，提出了能够增强全息加密安全性的加密相位全息标识技术，并进行了计算机仿真分析，证明该技术的可行性。

1.1.2 全息术原理

普通的摄影术记录的只是物光的光强信息，而全息照相不仅记录物体的光强信息，也能记录物光的相位信息。与普通的摄影术相比，全息照相有两个突出的优点：一是三维立体性，即全息照片再现出来的像可以是三维立体的，具有如同观看真实物体一样的立体感；二是可分割性，即全息照片的碎片也能反映出整个物体来，并不会因为照片的破碎而失去像的完整性。全息术原理包括两个过程，即全息图记录和再现。

1. 波前记录

波前记录的过程如图 1.1 所示，物光 O 和参考光 R 在全息记录面上进行干涉，形成明暗相间的干涉条纹，由记录干板或胶片等记录下来，就形成了全息照片，即全息图。其数学模型描述如下。

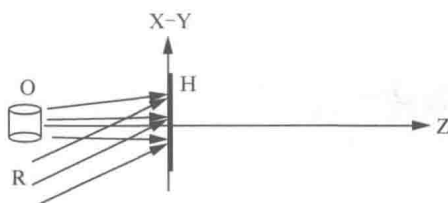


图 1.1 全息图的波前记录

设物光和参考光的复振幅分别为

$$\begin{aligned} O(x, y) &= O_0(x, y) \exp[j\phi_o(x, y)] \\ R(x, y) &= R_0(x, y) \exp[j\phi_r(x, y)] \end{aligned} \quad (1.1)$$

其中， O_0 、 ϕ_o 分别是物光到达全息干板上的振幅和相位分布， R_0 、 ϕ_r 分别是参考光的振幅和相位分布。两束光在全息干板上进行相干叠加，则总光场分布为

$$U(x, y) = O(x, y) + R(x, y) \quad (1.2)$$

干板记录的仅仅是干涉场光强度的分布，其光强分布为

$$\begin{aligned} I(x, y) &= U(x, y) \cdot U^*(x, y) \\ &= |O|^2 + |R|^2 + O \cdot R^* + O^* \cdot R \end{aligned} \quad (1.3)$$

经线性处理后，全息底片的透过率函数 t_H 与曝光强度成正比，去除一个无关紧要的比例常数，可得到

$$t_H(x, y) = |O|^2 + |R|^2 + O \cdot R^* + O^* \cdot R \quad (1.4)$$

这样得到的底片就是全息照片，这是一种最初级的全息照片。这样的照片记录了物光的光强和相位信息，即全息图。

2. 波前再现

波前再现过程如图 1.2 所示。参考光 C 照射全息干板，在特定的条件下，可以显示原物体图像，其数学模型描述如下。

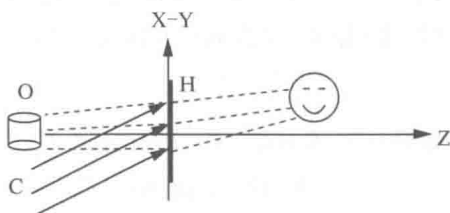


图 1.2 全息图的波前再现

设重现照明光波表示为

$$C(x, y) = C_0(x, y) \exp[j\phi_c(x, y)] \quad (1.5)$$

其中 C_0 、 ϕ_c 分别是再现光的振幅和相位分布。当用 $C(x, y)$ 照射全息图 H 时，透过 H 后的光振幅 $U'(x, y)$ 由式 1.6 表示为

$$\begin{aligned} U'(x, y) &= C(x, y) \cdot t_H(x, y) \\ &= C_0 O_0^2 \exp[j\phi_c(x, y)] + C_0 R_0^2 \exp[j\phi_c(x, y)] \\ &\quad + C_0 O_0 R_0 \exp[j(\phi_O - \phi_r + \phi_c)] \\ &\quad + C_0 O_0 R_0 \exp[-j(\phi_O - \phi_r - \phi_c)] \end{aligned} \quad (1.6)$$

式 1.6 是全息学的基本方程，其中方程右边各项的意义为：第一和第二项与再现光相似，它们与 $C(x, y)$ 具有完全相同的相位分布，只有振幅不同，因而它们将以与再现光相同的方式传播；第三项包含物的相位信息，但还有附加的相位信息，这一项有可能成为再现物像；第四项包含有物的共轭相位信息，这一项有可能形成共轭像。

当 $C(x, y) = R(x, y)$ 时，即用原参考光再现，这时有 $C_0(x, y) = R_0(x, y)$ ， $\phi_c = \phi_r$ ，式 1.6 变为

$$\begin{aligned}
 U'(x, y) = & R_0(O_0^2 + R_0^2) \exp(j\phi_r) \\
 & + R_0^2 O_0^2 \exp(j\phi_o) \\
 & + R_0^2 O_0^2 \exp[-j(\phi_o - 2\phi_r)]
 \end{aligned} \quad (1.7)$$

其中第二项与原物光波相比, 只增加了一个比例常数 R_0^2 , 若参考光 $R_0^2 = 1$, 则第二项就是原物光波, 所成的像称为原始像, 是虚像, 又称为一级像; 第三项为共轭像, 由于附加了一个相位因子, 这一项称为畸变的共轭像, 是实像, 又称为负一级像; 第一项保留了参考光的信息, 又称为零级像。

当 $C(x, y) = R^*(x, y)$ 时, 即用原参考光共轭光再现, 这时有 $C_0(x, y) = R_0(x, y)$, $\phi_c = -\phi_r$, 式 1.6 变为

$$\begin{aligned}
 U'(x, y) = & R_0(O_0^2 + R_0^2) \exp(-j\phi_r) \\
 & + R_0^2 O_0^2 \exp[j(\phi_o - 2\phi_r)] \\
 & + R_0^2 O_0^2 \exp[-j(\phi_o)]
 \end{aligned} \quad (1.8)$$

式 1.8 中, 第一项依然保留了参考光的特征; 第二项是畸变了的原始像, 是虚像; 第三项是与原物体相像的实像, 但出现了景深反演, 称为赝实像。原始像和赝实像通常是我们所需要的再现图像。

1.1.3 傅里叶变换全息图

1. 单透镜傅里叶变换系统

如图 1.3 所示, 在相干光的照射下, 透镜 L 的后焦面 (u, v) 平面上的复振幅分布正是位于它前焦面 (x, y) 平面上物体的傅里叶变换。由于透镜实现傅里叶变换必须要求输入面和输出面一定是在前后焦平面上, 因此, 透镜的傅里叶变换一般适合对平面物体的变换, 而一般的照片、数字图像或文字都是平面二维的, 所以透镜的傅里叶变换特别适合照片、数字图像或文字等的信息处理。

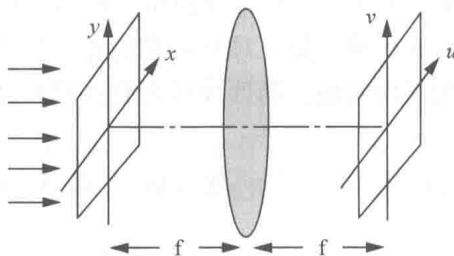


图 1.3 单透镜傅里叶变换系统

设输入面图像函数为 $f(x, y)$ ，透镜后焦面上的复振幅函数就是 $f(x, y)$ 的傅里叶变换，用 $F(f_x, f_y)$ 表示，经过系统后 $F'(u, v)$ 和 $f(x, y)$ 有如下关系式

$$F'(u, v) = \frac{\exp(j \times 2kf)}{j\lambda f} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp[-j \frac{2\pi}{\lambda f} (xu + yv)] dx dy \quad (1.9)$$

式 1.9 中， λ 为相干光波长， $k (=2\pi/\lambda)$ 为波数， f 为透镜的焦距， x, y 是 (x, y) 平面上的坐标， u, v 是后焦面 (u, v) 平面上的坐标。略去积分符号前面的常数相位因子，则可得到傅里叶变换关系式为

$$F(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp[-j \times 2\pi(xf_x + yf_y)] dx dy \quad (1.10)$$

式 1.10 中， $f_x = u/(\lambda f)$ ， $f_y = v/(\lambda f)$ ，即图 1.3 的单透镜傅里叶变换系统完成了输入面函数 $f(x, y)$ 的准确的傅里叶变换 $F(f_x, f_y)$ 。

2. 双透镜傅里叶变换系统

图 1.4 所示为双透镜傅里叶变换系统，透镜 L_1 将输入面 (x_1, y_1) 平面上的信息 $f(x_1, y_1)$ 进行傅里叶变换，变换成频谱面 (u, v) 平面上的复振幅分布为 $F(f_x, f_y)$ ，关系如式 1.11 表示。

$$F(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_1, y_1) \exp[-j \times 2\pi(x_1 f_x + y_1 f_y)] dx_1 dy_1 \quad (1.11)$$

同理，透镜 L_2 将频谱面 (u, v) 平面上的信息 $F(f_x, f_y)$ 进行傅里叶变换，变换成输出面 (x_2, y_2) 平面上的复振幅分布为 $g'(x_2, y_2)$ ，有

$$g'(x_2, y_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(f_x, f_y) \exp[-j \times 2\pi(f_x x_2 + f_y y_2)] df_x df_y \quad (1.12)$$

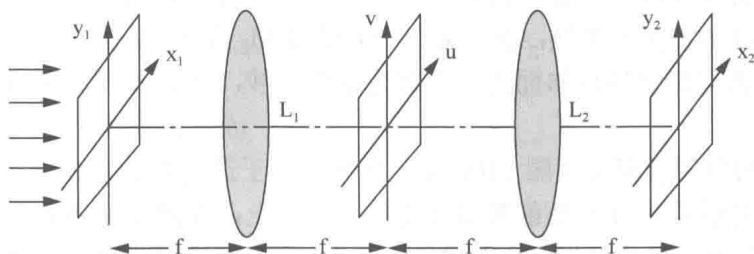


图 1.4 双透镜傅里叶变换系统

设 $\xi = -x_2$, $\eta = -y_2$, 则式 1.12 变成

$$g(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(f_x, f_y) \exp[-j \times 2\pi(f_x \xi + f_y \eta)] df_x df_y \quad (1.13)$$

式 1.13 即为傅里叶逆变换。式 1.11 和式 1.13 构成了傅里叶变换和傅里叶逆变换对, 而且有关系式 $g(\xi, \eta) = f(x_1, y_1)$ 成立。图 1.4 所示的双透镜傅里叶变换系统又称为基本 4f 系统, 变换后输入面和输出面图像实现了反转。在光信息处理中 4f 系统可以实现多种处理功能, 具有极其广泛的应用。

3. 傅里叶变换全息图

一束平行相干光照射放置在输入面上平面物体, 经过傅里叶变换系统变换后, 在频谱面上与另一束平行参考光叠加, 由光强敏感设备记录其干涉场光强度信息, 就形成了傅里叶变换全息图, 记录过程如图 1.5 所示。

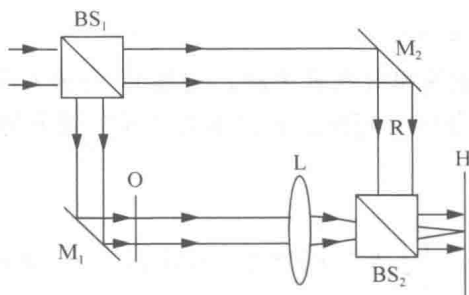


图 1.5 基于 Mach-Zehnder 结构的傅里叶变换全息图记录过程

图 1.5 中 BS_1 和 BS_2 是分束镜, L 是傅里叶变换透镜, O 是放置在透镜前焦面上的平面物体, H 是全息记录设备 (如 CCD) 或全息干板, M_1 、 M_2 是反射镜。一束平行相干光 (激光) 经 BS_1 分成两束平行光, 其中一束经过 M_1 反射垂直照射在输入平面物体 O 上, 经过透镜 L 的变换, 在 H 平面即透镜的后焦面上得到了平面物体 O 的傅里叶变换; 另一束参考光经过 M_2 的反射, 并经 BS_2 的合成, 也到达 H 平面即透镜的后焦面上, 两束光叠加干涉, 在 H 平面就形成了傅里叶变换全息图。

全息图的再现过程可用图 1.6 表示, H 平面位于透镜 L 的前焦面上, 一束平行再现光垂直照射在 H 平面的傅里叶变换全息图上, 在透镜 L 的后焦面上会出现四个像, 即物函数的自相关项形成的晕轮光, 分布在原点附近; 直射光形成的焦点处的亮斑点, 集中在原点; 原始像和赝实像, 它们的分布主要是和参考光的平面倾角有关, 适当的倾角可以使原始像和赝实像分开, 并与原点处的晕轮光分