

光学调频连续波 干涉技术

Optical Frequency-Modulated
Continuous-Wave (FMCW) Interferometry

[加] 郑 刚 (Jesse Zheng) 著
缪寅宵 刘 柯 宋金城 等 译



中国宇航出版社

光学调频连续波干涉技术

Optical Frequency – Modulated Continuous –
Wave (FMCW) Interferometry

[加] 郑 刚 (Jesse Zheng) 著

缪寅宵 刘 柯 宋金城 郭力振 译
朱 浩 王晓光 郭天茂



中国宇航出版社

· 北 京 ·

First published in English under the title

Optical Frequency - Modulated Continuous - Wave (FMCW) Interferometry

by Jesse Zheng, edition: 1

Copyright © Springer - Verlag New York, 2005 *

This edition has been translated and published under licence from

Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature.

Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature takes no responsibility and shall not be made liable for the accuracy of the translation.

本书中文简体字版由著作权人授权中国宇航出版社独家出版发行，未经出版者书面许可，不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

著作权合同登记号：图字：01-2019-1271

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

光学调频连续波干涉技术 / (加) 郑刚

(Jesse Zheng) 著 ; 缪寅宵等译. --北京:中国宇航出版社,2019.7

书名原文: Optical Frequency - Modulated Continuous - Wave (FMCW) Interferometry

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1657 - 6

I. ①光… II. ①郑… ②缪… III. ①调频连续波雷达 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 139577 号

责任编辑 彭晨光

封面设计 宇星文化

出版

发行

社址

中国宇航出版社

北京市阜成路 8 号

邮 编 100830

(010)60286808

(010)68768548

网 址

www.caphbook.com

经 销

新华书店

发行部

(010)60286888

(010)68371900

(010)60286887

(010)60286804(传真)

零售店

读者服务部

(010)68371105

承 印

河北画中国画印刷科技有限公司

版 次

2019 年 7 月第 1 版

2019 年 7 月第 1 次印刷

规 格

880 × 1230

开 本 1/32

印 张

7.5

字 数 215 千字

书 号

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1657 - 6

定 价

168.00 元

本书如有印装质量问题，可与发行部联系调换

译著序

基于光学干涉原理的仪器在精密测量领域发挥着重要作用。以波长为尺度,许多物理量如距离、位移、速度、温度、压力、电场、磁场、振动振幅、旋转速度甚至引力波都能够通过光学干涉的方法进行测量。

在物理光学中,人们很早就系统地研究了相同频率光波之间的干涉和不同频率光波之间的干涉问题。但由于缺少合适的光源,人们从来没有讨论过频率连续调制的光波之间的干涉问题。直到20世纪80年代早期,单模半导体激光器的发明结束了这种情况。光学调频连续波干涉的研究不仅拓展了人们对于光的特性认识,更创造了一种用于精密测量的新技术。此外,光纤技术的发展为光的传播提供了一种低噪声、低损耗、长距离且非常灵活的途径。自然地,人们开始利用光纤构建干涉系统,避免了光学干涉技术对自由空间光路的苛刻要求。光纤的应用极大地拓展了光学干涉测量技术的应用领域,出现了基于光学调频连续波干涉原理的位移、应力、压力、温度、旋转等光纤传感器,这些传感器在科学研究以及工程测量领域得到了广泛应用。

由郑刚(Jesse Zheng)著的《光学调频连续波干涉技术》一书是作者多年教学和科研工作的总结,它全面系统地论述了光学调频连续波干涉的基本理论,并结合工程应用对相关器件特性、常用FMCW干涉仪结构形式、工作原理、构建方法以及应用领域进行了深入的探讨,并对极具工程应用前景的光纤、光学调频连续波干涉

传感器进行了讨论分析。本书讨论的问题概念清晰、理论严谨，是一本比较全面、系统地论述光学调频连续波干涉理论和应用的著作。

本书由缪寅宵、刘柯、宋金城、郭力振、朱浩、王晓光、郭天茂翻译，在出版过程中得到了中国宇航出版社编辑的热情帮助，在此一并表示感谢。由于译者知识水平有限，且翻译时间仓促，书中难免会有一些不妥之处，恳请广大读者批评指正。

前 言

光学干涉在科学研究和现代科技发展过程中有着重要影响。历史上,光学干涉对于建立光的波动特性理论发挥了重要作用。当下,光学干涉仍然在诸如光谱学和计量学等诸多领域扮演着重要角色。迄今为止,物理光学方面的著作已经讨论了单一同频光波之间的干涉(即零差干涉),以及两个不同频率的光波之间的干涉(即外差干涉)。但是至今几乎没有讨论频率连续可调的光波之间的干涉问题(即调频连续波干涉)。

调频连续波(Frequency-modulated continuous-wave, FMCW)干涉首先于20世纪50年代应用在雷达领域,最近又被引入到光学领域。对于光学FMCW干涉的研究不仅让我们对光的特性有了新的认识,更创造了一种用于精密测量的高新技术。

本书介绍了光学FMCW干涉的原理、应用以及信号处理过程。本书的框架结构很明确。第1章对光学FMCW干涉做了一个简要介绍,主要涉及它的发展历史、基本概念和主要优势。第2章的重点放在了光学FMCW干涉的原理上,对三种不同的光学FMCW干涉——锯齿波光学FMCW干涉、三角波光学FMCW干涉和正弦波光学FMCW干涉进行了详细的讨论,不仅如此,本章还讨论了多光束光学FMCW干涉和多波长光学FMCW干涉。

第3章介绍了光学FMCW干涉的光源。由于在实践中,只有激光能够作为调频光源,而且通常使用的都是半导体激光器,因此本

章首先介绍激光的基本原理,包括受激发射、粒子数反转、光学谐振器、激光模式和频率调制,然后讨论半导体激光器的典型特性。第4章介绍了用于光学 FMCW 干涉的光探测器。对通常使用的半导体光电二极管(包括 PN 型光电二极管、PIN 型光电二极管和雪崩光电二极管)的工作原理以及相关问题(如二极管偏压、光电流放大和噪声源等)进行了详细的讨论。

第5章讨论了光学 FMCW 干涉的相干理论,包括光源频率带宽的影响、光学 FMCW 波的相干性和光源相位噪声的影响。第6章首先介绍了建立光学 FMCW 干涉仪的基本要求和相关技术,然后给出了几款由经典零差干涉仪(如迈克尔逊 FMCW 干涉仪、马赫-泽德 FMCW 干涉仪和法布里-珀罗 FMCW 干涉仪)改造而来的光学 FMCW 干涉仪作为示例。

第7、8、9章讨论了光纤 FMCW 干涉仪和光纤 FMCW 干涉传感器。光纤是圆柱形的光学波导,已经被广泛地应用在图片传输和光通信领域,它提供了一种低噪声、低衰减、低损耗、长距离和高灵活性的光传播方式。光纤和光纤器件在光学干涉仪中的应用能够使干涉仪简洁、可靠、灵活并且更精密。而且,利用光纤技术,可以开发更先进的检测技术,更复杂的干涉仪,甚至“固体”干涉仪(即全光纤干涉仪)。

第7章首先简要介绍了光纤和光纤器件,然后介绍了几款典型的光纤 FMCW 干涉仪,包括光纤迈克尔逊 FMCW 干涉仪、光纤马赫-泽德 FMCW 干涉仪和光纤法布里-珀罗 FMCW 干涉仪。第8章讨论了光纤 FMCW 干涉仪的多路复用技术。详细讨论了四种重要的多路复用方法(频分复用、时分复用、时频复用和相干复用)以及相关的多路复用光纤 FMCW 干涉仪。第9章介绍了几种基于光学 FMCW 干涉的高级光纤传感器,包括光纤 FMCW 干涉位移传感器、

光纤 FMCW 干涉应变传感器、光纤 FMCW 干涉压力传感器、光纤 FMCW 干涉温度传感器和光纤 FMCW 干涉旋转传感器（即光纤 FMCW 陀螺仪）。

第 10 章讨论了光学 FMCW 干涉的信号处理过程。详细讨论了频率测量和相位测量的三种不同方法。

本书是基于作者对这个领域 20 多年的研究经验编写的。作者已经尽了最大的努力，力图让本书内容变得清晰、简洁。书中对所涉及的所有光学 FMCW 干涉的贡献者都给予了赞许；不过，对于在其他相关领域的发明者并未全部致谢。

本书的目标读者是相关领域的科学家、工程师和同时工作在学术界和工业界的研究者。本书尤其适用于在测量仪器领域工作的专业人士。也可作为高等院校高年级本科生或研究生的一本介绍现代光学干涉的教材。

我特别感谢 Springer - Verlag New York 的汉斯·凯尔奇 (Hans Koelsch) 博士，感谢他在本书立项中的大力帮助。也感谢我的儿子郑岩 (Jack)，他在本书稿件的准备过程中，给予了极为珍贵的帮助。最后，将此书献给我的妻子赵颖 (Nancy)，感谢她一如既往的鼓励和支持。

郑刚 (Jesse Zheng)

2004 年于温哥华

主要符号表

英文字母类符号

A	放大器增益
A_{21}	爱因斯坦自发发射系数 ($A_{21} = 8\pi h\nu_{21}^3 B_{21}/c^3$)
B	磁场
B_{12}	爱因斯坦受激吸收系数
B_{21}	爱因斯坦受激发射系数 ($B_{21} = B_{12}$)
c	自由空间中的光速
C	电容器件的电容值
C_B	布儒斯特常数 (Brewster constant)
D	光探测器的探测率
D	光纤定向耦合器的方向性
D^*	光探测器的比探测率
e	电子电荷的大小 ($e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)
E	电场
E	能级
E_0	电场的幅值
E_F	费米能量 (或费米能级) (Fermi energy, Fermi level)
E_g	能带间隙
f	光波的波数 (或空间频率)
f_c	光探测器的斩波频率
f_e	电子允许状态的占有概率
f_h	空穴允许状态的占有概率
F	垂直方向的作用力

g	激活介质的增益系数
g_{th}	阈值增益系数
h	普朗克常数 (Planck constant, $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
I	光波光强
I	光探测器的光电流
I_0	光波的光强振幅
J	电流密度
k	光波的传播常数
k	光纤陀螺仪的比例因子
k	光波的传播矢量
k_B	玻耳兹曼常数 (Boltzmann constant, $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)
l	长度或距离
l_c	光源的相干长度
L_e	光纤定向耦合器的附加损耗
L_i	光纤定向耦合器的插入损耗
M	雪崩光电二极管的倍增因数
n	透明材料的折射率
n_e	单模光纤的有效折射率
n_{ex}, n_{ey}	HE_{11}^x 模和 HE_{11}^y 模的有效折射率
n_{ce}, n_{ve}	导带和价带的电子数
n_{vh}, n_{ch}	导带和价带的空穴数
N	能级的粒子密度
NA	光纤的数值孔径
NEP	噪声等效功率
OPD	光程差
OPL	光程长度
P	光功率
P	梯度折射率杆的倾角
Q	激光器腔 Q 因数

r	位置矢量
r_{63}	晶体的电光系数
R	光纤定向耦合器的耦合系数
R	反射面的反射率
R	电阻器件的阻值
$\mathfrak{R}$	光探测器的响应度
s	物体的速度
t_c	光源的相干时间
T	光波的时间周期
T_b	拍频信号的周期
T_m	调制信号的周期
V	电压
V	光纤的归一化频率
V	费尔德常数 (Verdet constant)
V	干涉条纹或拍频信号的可见性 (或对比度)

希腊字母类符号

α	光波的角频率调制速率
α	光学谐振器的平均损耗系数
β	半导体激光器的增益系数
β	运算放大器的开环增益
β	光纤中导模的传播常数
γ	时间相干性的复杂程度
Γ	自相干函数
Δ	光纤的相对折射率差
ε	介电常数
ζ	双折射率光纤的模耦合系数
ζ	电子空穴对对光电流的贡献比
η	双折射率光纤的耦合损耗系数

η	PZT 管光纤相位调制器的相位调制效率
η	光探测器的量子效率
θ_B	布拉格角 (Bragg angle)
θ_c	光纤的临界接收角度
λ	介质中的光波长度
λ_0	光在自由空间中的中心波长
λ_0	光在自由空间中的波长
λ_c	光电二极管的截止波长
λ_s	合成波的波长
Λ	双折射光纤的拍长
Λ	声波的波长
ν	光波的频率
ν_b	拍频信号的频率
ν_D	多普勒频移 (Doppler frequency shift)
ν_m	调制信号的频率
ν_s	合成波的频率
$\delta\nu$	光源的频率带宽
$\Delta\nu$	光源的频率调制偏移
ρ	辐射能量密度
σ	噪声的标准偏差
τ	相对参考光束的信号光束的延迟时间
τ	光波的传播时间
τ	光探测器的时间常数
v	光在介质中的速度
ϕ	光波的相位
ϕ_0	光波的初始相位
ϕ_{b0}	拍频信号的初始相位
$\delta\phi_0$	光源的相位噪声
ω	光波的角频率

ω	激光束的横截面半径
ω_0	光中心角频率
ω_b	拍频信号的角频率
ω_D	多普勒角频率偏移 (Doppler angular frequency shift)
ω_m	调制信号的角频率
$\Delta\omega$	光波的角频率调制偏移

目 录

第 1 章 光学调频连续波干涉介绍	1
1.1 发展历史	2
1.2 光学 FMCW 干涉及其特性	4
第 2 章 光学调频连续波干涉原理	7
2.1 物理光学概述	7
2.2 光学 FMCW 干涉	15
2.2.1 锯齿波光学 FMCW 干涉	19
2.2.2 三角波光学 FMCW 干涉	25
2.2.3 正弦波光学 FMCW 干涉	29
2.3 多光束光学 FMCW 干涉	33
2.4 多波长光学 FMCW 干涉	35
第 3 章 光学调频连续波干涉的光源	39
3.1 光源介绍	39
3.2 激光原理	40
3.2.1 发光物质中的能级	40
3.2.2 光吸收和光发射	41
3.2.3 激活介质和粒子数反转	43
3.2.4 光学谐振器和激光模式	46
3.2.5 频率调制	50
3.3 半导体激光器 (激光二极管)	55
3.3.1 半导体中的能带	55

3.3.2	半导体中光的吸收和辐射	58
3.3.3	半导体激光器的激活介质和粒子数反转	59
3.3.4	半导体激光器的光谐振和模式	66
3.3.5	半导体激光器的频率调制	68
3.3.6	半导体激光器的驱动电路	71
3.3.7	激光器噪声、频率漂移和反馈光效应	72
第4章	光学调频连续波干涉探测器	75
4.1	光学探测器简介	75
4.2	半导体光电二极管	77
4.2.1	PN型光电二极管	78
4.2.2	PIN型光电二极管	81
4.2.3	雪崩光电二极管 (APD)	82
4.3	光电二极管偏置和信号放大	84
4.4	探测过程中的噪声	87
第5章	光学调频连续波干涉相干理论	89
5.1	光源频率带宽的影响	89
5.2	光学 FMCW 波的相干性	94
5.3	光源相位噪声的影响	96
第6章	光学调频连续波干涉仪	99
6.1	光学 FMCW 干涉仪的结构	99
6.2	迈克尔逊 FMCW 干涉仪	103
6.3	马赫-泽德 FMCW 干涉仪	106
6.4	法布里-珀罗 FMCW 干涉仪	107
第7章	光纤调频连续波干涉仪	108
7.1	光纤简介	108
7.1.1	单模光纤	112
7.1.2	双折射光纤	113
7.2	光纤器件简介	116

7.2.1 光纤定向耦合器	117
7.2.2 光纤偏振器	120
7.2.3 光纤偏振控制器	122
7.2.4 光纤连接器	123
7.2.5 光纤对接	126
7.3 光纤迈克尔逊 FMCW 干涉仪	128
7.4 光纤马赫-泽德 FMCW 干涉仪	130
7.5 光纤法布里-珀罗 FMCW 干涉仪	132
第 8 章 多路复用光纤 FMCW 干涉仪	134
8.1 频分复用光纤 FMCW 干涉仪	134
8.2 时分复用光纤 FMCW 干涉仪	137
8.3 时频复用光纤 FMCW 干涉仪	139
8.4 相干复用光纤 FMCW 干涉仪	140
第 9 章 光纤调频连续波干涉传感器	143
9.1 光纤传感器简介	143
9.2 光纤 FMCW 干涉位移传感器	145
9.2.1 反射式单模光纤 FMCW 位移传感器	145
9.2.2 多路反射式单模光纤 FMCW 位移传感器	148
9.3 光纤 FMCW 干涉应变传感器	165
9.3.1 双折射光纤在拉伸力下的属性	165
9.3.2 双折射光纤 FMCW 应变传感器	168
9.3.3 反射式双折射光纤 FMCW 应变传感器	172
9.4 光纤 FMCW 干涉应力传感器	176
9.4.1 双折射光纤在垂直力作用下的表现	176
9.4.2 透射分布式双折射光纤 FMCW 应力传感器	178
9.4.3 反射分布式双折射光纤 FMCW 应力传感器	180
9.5 光纤 FMCW 干涉温度传感器	183
9.5.1 反射式单模光纤 FMCW 温度传感器	183

9.5.2 多路反射式单模光纤 FMCW 温度传感器	185
9.6 光纤 FMCW 干涉旋转传感器 (陀螺仪)	185
9.6.1 光纤陀螺仪的原理	186
9.6.2 单模光纤 FMCW 陀螺仪	194
9.6.3 差分单模光纤 FMCW 陀螺仪	196
9.6.4 双折射光纤 FMCW 陀螺仪	197
9.6.5 差分双折射光纤 FMCW 陀螺仪	199
第 10 章 光学调频连续波干涉信号处理	203
10.1 频率测量	204
10.1.1 时间固定周期计数法	204
10.1.2 数值固定周期计数法	206
10.1.3 脉冲填充法	208
10.2 相位测量	209
10.2.1 脉冲填充法	210
10.2.2 锁相环法	211
10.2.3 数字信号处理法	212
参考文献	213