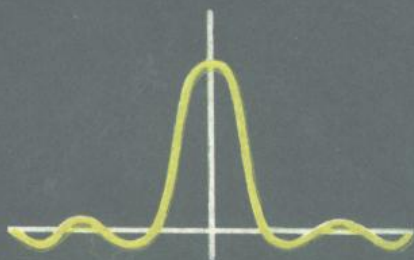


[美] B. 塞勒 著

光电子统计学

及光谱与光通讯应用



科学出版社

光 电 子 统 计 学

及光谱与光通讯应用

〔美〕B. 塞勒 著

韩家瑞 李庆绩 译

科 学 出 版 社

1985

内 容 简 介

近年来把光当作随机起伏的激发过程来描述是对光进行探讨的一个共同特点,本书旨在对基本理论作全面的概述。全书内容分为三个部分,即:随机函数和随机点过程的数学统计描述、各种光场的统计理论及其在光谱学和光通讯中的应用。

本书内容详尽,逻辑性强,对各种统计模型的探讨更有独到之处。本书适于从事相干理论、光电子统计学、大气传输、光通讯、光子相关光谱学及光电技术应用等专业的科研技术工程人员阅读,也可作为上述专业的教学用书。

B. Saleh

PHOTOELECTRON STATISTICS

With Applications to
Spectroscopy and Optical Communication
Springer-Verlag 1978

光电子统计学 及光谱与光通讯应用

〔美〕B. 塞勒 著

韩家瑞 李庆绩 译

责任编辑 刘海龄

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985年9月第一版 开本:787×1092 1/32

1985年9月第一次印刷 印张:14 5/8

印数:0001—3,100 字数:328,000

统一书号:15031·665

本社书号:4238·15—4

定价: 3.40 元

前 言

随着近代光学和激光应用的迅猛发展,出现了许多新的研究领域,其中包括:相干理论、光子统计学、斑纹现象、统计光学、大气传播、光通信以及光的差拍和光子相关光谱学。这些相互交叉的学科,其共同点在于它们都与光按随机起伏扰动的处理有着基本的关系。而且,它们都要求对光的检测现象以及由此而引入的附加随机性有一个透彻的了解。撰写本书的宗旨是要对这些领域的重要基本理论背景,提供一种既统一又普遍的描述。

本书目的有三:(1)介绍一种光场统计特性的系统处理方法;(2)研究用以确定该场被光探测器截获时,所引起的光电子事件统计特性的方法;(3)探讨一些根据对光电子事件的测量来估计未知场参量的方法。本书的重点是光电子测量。因为从中可以获得一些有关光谱学和光通信方面的信息。

虽然某些讨论光的相干理论和统计特性的书籍都是有价值的,然而大量与光电子统计特性及其应用方面有关的重要资料,却都分散在各个不同的专业杂志和会议录中。

本书主要是针对有志于相干理论和光电子统计学及其应用的电气工程和物理学方面的研究生撰写的。同时也可作为从事光通信及光子相关光谱学方面研究人员的参考书。

该书的详细介绍可在第一章中读到。本书基本上可分为三个部分:第一部分评述了描述随机函数(诸如光场和辐射分布)和随机点过程(诸如光电子现象)所需要的数学工具;第二部分,利用概率论中的一些普遍概念,研究了光和光电子间

题。为了得到有关相干和光电子统计学的简单推论，只要作少量的假定就够了。对许多光(例如：热光、激光、散射光、调制光、漫射光、偏振光)的统计学模型，都作了详细的探讨；第三部分研究了从被检测光电子的许多测量结果中，如何提取有关光场性能(例如：光强、光谱、以及统计学模型)的信息。并且详细讨论了光电子相关光谱学理论，以及光电子统计特性对光通信和雷达系统性能的影响。

Bahaa Saleh

1977.3

加利福尼亚州，伯克利

缩写符号表

CAS	复解析信号	mgf	矩母函数
cgf	累积母函数	ML	最大似然
x_N^2	具有 N 个自由度的 x 平方分布	MMSE	最小均方误差
Cov	协变, 协方差	PD	概率分布
CRV	复随机变量	PDC	多重概率分布
DSP.PP	双重随机泊松点过程	P_P	点过程
fmgf	阶乘矩母函数	.PP	泊松点过程
JPD	联合概率分布	Pr	概率
K-L	卡哈内-乐维(人名)	psf	点扩散函数
MAP	最大先验概率	RV	随机变量
		Var	方差

书中用到的函数¹⁾

$D_n(x)$	抛物柱面函数	$I_n(x)$	第一类修正贝塞尔函数
$\delta(x)$	δ 函数	$J_n(x)$	第一类贝塞尔函数
$E_i(x)$	指数积分函数	$J(x) = 2J_1(x)/x$	
${}_2F_1(\alpha, \beta; \gamma; x)$	高斯超几何函数	$L_n^m(x)$	拉盖尔多项式
$\Gamma(x)$	伽马函数, $\Gamma(n) = (n-1)!$	$L_n(x) = L_n^0(x)$	
$\Gamma(a, x)$	非完全伽马函数	$P_n(x)$	勒让得多项式
		$\Phi(x)$	概率积分

1) 函数的定义和性质可查阅文献[134]

$\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$

$\text{sh}(x) = \sinh(x)/x$

$W_{n,m}(x)$ Whittaker 函数

$$\left| \begin{matrix} n-1 \\ m-1 \end{matrix} \right| = \frac{\Gamma(n)}{\Gamma(m)\Gamma(n-m+1)}$$

• 2 •

目 录

第一章 引言	1
--------------	---

第一部分 关于统计数学方面的预备知识

第二章 随机变量及随机过程的统计描述	5
--------------------------	---

2.1 随机变量的统计描述	6
---------------------	---

2.1.1 概率分布(PD)	6
----------------------	---

2.1.2 随机变量矩	6
-------------------	---

2.1.3 随机变量矩母函数 (mgf)	8
----------------------------	---

2.1.4 某些标准随机变量	13
----------------------	----

2.1.5 随机变量变换	13
--------------------	----

2.2 一组随机变量的统计描述	13
-----------------------	----

2.2.1 概率分布	13
------------------	----

2.2.2 矩量和相关性	14
--------------------	----

2.2.3 矩母函数	16
------------------	----

2.2.4 举例: 一组联合高斯随机变量	17
----------------------------	----

2.2.5 随机变量的变换	18
---------------------	----

2.3 复随机变量的统计描述	20
----------------------	----

2.3.1 复随机变量 (CRV)	20
-------------------------	----

2.3.2 圆对称复随机变量	20
----------------------	----

2.3.3 圆对称的高斯复随机变量	22
-------------------------	----

2.3.4 一组复随机变量	23
---------------------	----

2.4 随机过程的统计描述	25
---------------------	----

2.4.1 定义	25
----------------	----

2.4.2 随机过程的随机谱、平稳随机过程的功率谱	27
---------------------------------	----

2.4.3 高斯过程	29
------------------	----

2.4.4	用 Karhunen-Loève 展开式的系数来描述的随机过程	30
2.4.5	用微分方程描述随机过程	34
2.5	复随机过程	38
2.5.1	定义	38
2.5.2	复随机过程的 Karhunen-Loève 展开式	40
2.6	带通随机过程的复数表示法	41
2.6.1	实带通信号的复数表示法	41
	带通信号的复数包络 (幅度)	42
2.6.2	实带通随机过程的复数表示法	43
2.6.3	平稳实带通随机过程的复数表示法	45
2.6.4	具有平稳正交分量的过程	48
	准平稳过程	48
2.6.5	高斯带通随机过程的复数表示法	49
2.6.6	带通随机过程复数包络的 Karhunen-Loève 表达式	49
2.7	对某些估计原则及检测理论的简评	51
2.7.1	检验假设	51
	最大似然 (ML) 方案	51
	Bayes 方案	52
2.7.2	参数的估计	53
	最大似然的 (ML) 估计	53
	Bayes 估计	53
	最小均方误差的非线性拟合	54
第三章	点过程	56
3.1	一维点过程	56
3.2	发生时间的统计特性	58
3.2.1	多重联合概率密度	59
3.2.2	前向再发时间的联合概率密度	59
3.2.3	偶然事件间隔的联合概率密度	60
3.2.4	在闭区间内事件数目及其出现瞬间的联合概率	

密度	61
3.2.5 母函数	62
3.3 计数统计特性	62
触发计数	64
3.4 泊松过程	64
3.4.1 定义	64
3.4.2 时间统计特性	65
3.4.3 计数统计特性	67
概率	67
矩母函数	68
矩	69
3.5 双重随机泊松点过程 (DSP. PP)	71
3.5.1 定义	71
3.5.2 计数统计学	71
矩母函数	71
矩	72
概率分布	75
3.5.3 时间统计特性	76
3.6 附录: 泊松变换	78
3.6.1 定义和性质	78
3.6.2 泊松变换的反演	81
方法 I	82
方法 II	82
方法 III	83

第二部分 理 论

第四章 光场: 一种随机矢量场或光相干性的经典理论	84
4.1 光的经典统计描述	87
4.1.1 电磁场的经典论述	87

4.1.2 光的统计描述	91
联合概率密度与相关函数(相干函数)	92
时-频域的描述	93
相干函数的归一化。光的相干度	94
相干函数时空依赖关系的因式分解: 交叉谱纯	98
相干时间和相干面积	99
光强度: 实随机过程	100
4.1.3 光在线性光学系统中传播的统计描述	101
空间非相干光的衍射	103
从两个针孔出来的部分相干光的衍射。杨氏干涉实验	105
传播对交叉谱纯的影响	108
迈克耳孙干涉仪	111
4.2 一些特殊光场模型的统计特性	112
4.2.1 热偏振光	112
强度起伏	114
4.2.2 部分热偏振光	118
强度起伏	120
总强度起伏	121
4.2.3 相干光和热光的偏振叠加	123
强度起伏	124
4.2.4 相干光和部分热偏振光的混合	128
4.2.5 准平稳高斯光	129
场的统计特性	130
强度统计特性	130
矩母函数	131
概率密度	132
4.2.6 热瞬变光	133
4.2.7 激光的范·德尔·波尔(Van der Pol)非线性振荡器经典模型	134
强度起伏	138

场的相关性	141
强度相关函数	142
4.2.8 光的少量无关模式之和	142
联合统计学	148
数目起伏	149
4.2.9 相位起伏光(或漫射光)	150
同相干场混合的相位起伏场	152
通过光学系统传播以后的相位起伏光. 散斑现象	154
 第五章 光电子事件: 一种双随机泊松过程或光电子统计理论.....	158
5.1 光的光电检测	159
5.1.1 光检测方程的半经典推导	159
5.1.2 光电子与光子的关系	163
5.2 某些特定光场的单重光电子统计法	164
5.2.1 相干光	165
5.2.2 热线性偏振光	165
短抽样时间, 小检测器 $T \ll \tau_c, A \ll A_c$	166
任意抽样时间, 小检测器面积 $A \ll A_c$	169
任意抽样时间和任意的检测器面积. 交叉谱纯光...	186
具有任意光谱、任意 T/τ_c 和 A/A_c 光的近似统计 特性	190
数值方法	193
5.2.3 部分热偏振光	195
$T \ll \tau_c$ 的极限情况	197
$T \gg \tau_c$ 的极限情况	198
具有洛伦兹谱的部分热偏振光	199
5.2.4 相干偏振光和热偏振光的混合	201
$T \ll \tau_c, A \ll A_c, \Delta\omega T \ll 1$	201
T/τ_c 和 $\Delta\omega T$ 是任意的, $A \ll A_c$	204

$T \ll \tau_c, A \ll A_c$, 任意的 $\Delta\omega T$ 及相干分量不变的情况	208
$T \gg \tau_c, A \ll A_c$, 任意的 $\Delta\omega T$ 及相干分量不变的情况	210
热光部分具有洛伦兹谱	212
检测器面积的影响	215
近似公式	218
5.2.5 相干光和热偏振光的混合	219
$T \ll \tau_c, A \ll A_c, T\Delta\omega \ll 1$ 的极限情况	220
N 个模式	220
5.2.6 准稳态高斯光	221
实数振幅	221
通用的复数振幅	224
5.2.7 瞬变热光	225
5.2.8 用 Van der Pol 振荡器模型描述激光	227
时间的统计特性	228
5.2.9 受调光束	229
热噪声调制的相干光	232
实振幅高斯噪声调制的相干光	232
热噪声调制的热光(高斯-高斯散射)	232
强度受实高斯噪声调制的热光	234
采用与抽样信号不同步的周期性固定信号进行强度调制	236
对数正态调制光	241
5.3 多重光电子的统计特性	248
5.3.1 热偏振光	249
$T \ll \tau_c$ 和 $A \ll A_c$ 的极限情况	249
单个的小检测器 ($A \ll A_c$), 任意抽样时间	253
任意面积的单个的检测器. 任意抽样时间	258
对若干个光检测器同时进行计数. 交叉谱纯光	260
近似公式	261

时间的统计特性. 多重概率密度 PDC.....	262
5.3.2 相干光和热偏振光的混合	267
$T \ll \tau_c$, $A \ll A_c$ 和 $T\Delta\omega \ll 1$ 的极限情况	267
任意的 T/τ_c , A/A_c 和 $T\Delta\omega$	268
5.4 光检测器的非理想效应	270
5.4.1 暗电流	270
5.4.2 空载时间效应	271
矩	275
联合概率分布	277
5.4.3 光电电流弛豫和光电倍增器增益起伏	278

第三部分 应 用

第六章 光通信应用.....	283
6.1 光通信系统的分类	285
6.2 光信号的估计. 直接检测	287
6.2.1 稳态光场强度的估计	288
相干光	289
热光	289
热背景相干光	290
热背景强度未知情况下的相干光	292
热背景光强度未知情况下的热光	293
通过不同的相干时标, 将混在一起的两种光场强度 区别开来	296
6.2.2 具有时变强度光信号的估算问题	297
相干信号. 强度调制 (IM)	297
热背景中的相干信号	299
强度分布参数的估计	299
6.3 光信号的估计. 外差检测	301
6.3.1 相干时变光信号的估计. 幅度调制、强度调制、 频率调制和相位调制系统	301

检测器面积的影响, 校准问题	304
6.3.2 热背景中稳态热光信号强度的零差拍估计	307
6.4 光信号的检测	311
数字通信系统	311
6.4.1 宽带热背景光情况下相干信号的检测	312
门脉冲二进制调制 (PGBM), 雷达信号的检测	313
脉冲延迟二进制调制 (PDBM), 二进制脉冲位置调 制 (PPM)	316
二进制偏振调制 (BPLM)	318
脉冲位置调制 (PPM)	318
6.4.2 掺杂有任意带宽热背景的相干信号的检测, 检 测器的任意面积	321
门脉冲二进制调制 (PGBM), 雷达信号的检测	322
脉冲位置调制 (PPM), 脉冲延迟二进制调制 (PDBM), 脉冲偏振调制 (BPLM)	324
6.4.3 掺杂热背景的起伏信号的检测	325
6.4.4 有大气闪光时的检测	327
门脉冲二进制调制 (PGBM), 相干雷达信号的检测	329
脉冲位置调制 (PPM)	333
雷达信号检测器性能差异的影响, 阵列式检测器	334
6.4.5 外差检测	337
门脉冲二进制调制系统, 雷达信号的检测	337
相移开关 (PSK)	338
起伏雷达信号的检测	338
6.5 根据光电子瞬时出现所得到的结论	340
6.5.1 估值问题	340
相干信号参量	340
热信号参量	342
光信号时变随机参量的估计	344

6.5.2 检测问题	346
相干信号	346
热信号	347
6.6 结束语	348
第七章 在光谱学中的应用	350
7.1 根据光电子计数起伏的自相关测量来估计光谱	352
7.1.1 自相关函数	352
热光	353
热光与相干光的混合	354
相干光和统计特性不确定的光的混合	355
N 个无关的光分量之和	356
由高斯噪声调制的相干光	356
7.1.2 自相关函数的测定	356
软件相关器	357
硬件相关器	358
序贯过程相关器	359
7.1.3 归一化自相关函数	360
7.1.4 限幅相关函数	361
热光	364
相干光和热光的混合	367
光的 N 个无关分量之和	369
高斯噪声调制的相干光	370
限幅数字相关器	370
7.1.5 补偿限幅	372
7.1.6 随机限幅自相关函数	373
7.1.7 缩尺自相关函数	375
7.1.8 估计自相关函数的统计精度	377
完全自相关函数	377
归一化全相关函数	383
限幅自相关函数	389
7.1.9 估计已知光谱形状的未知参量的精度	391

7.1.10 总结	397
7.2 根据概率分布的测量来估算光谱参量	398
7.2.1 符合概率	399
多通道重合	399
7.2.2 时间间隔概率。脉冲分离技术	400
统计精度	402
光谱参量的测量	402
7.2.3 单个光电子计数概率	403
7.2.4 联合光电子计数概率	407
7.2.5 瞬间出现的实际光电子事件	408
7.3 单个光电子衰变光谱学	409
7.3.1 相干光	412
光谱仪 I	412
光谱仪 II	415
7.3.2 光的相干影响	417
7.4 空间光谱的估计(空间相干函数)	418
7.4.1 数字互相关器	421
7.4.2 统计精度	422
参考文献	426
中英名词索引	438