

柯熙政 邓莉君 著

无线光通信



科学出版社

无线光通信

柯熙政 邓莉君 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书内容涉及无线激光通信、可见光通信、紫外光通信及水下光通信，并对未来的通信技术进行展望。本书探索在学术性与科普性、高雅与通俗、理论性与实用性之间进行有机的融合、合理的折中与适当的取舍。书中尽量避免烦琐的数学推导，而将一些理论性强的内容作为习题，供进一步学习的读者练习与提高之用。习题主要来源于国内外科技期刊已公开发表的论文，读者通过习题可以了解该领域国内外发展历程，并检验对基础知识的掌握程度。

本书可供通信工程、电子信息与计算机类本科生、研究生以及相关领域工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

无线光通信/柯熙政, 邓莉君著. —北京: 科学出版社, 2016.3
ISBN 978-7-03-047582-4

I. ①无… II. ①柯… ②邓… III. ①光通信 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 046603 号

责任编辑: 余 丁 赵艳春 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717
<http://www.sciencep.com>

文 林 印 务 有 限 公 司 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月 第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2016 年 3 月 第 一 次 印 刷 印张: 15 1/2

字数: 295 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着高速大容量光通信系统的不断发展，接入网的“瓶颈效应”这一问题越来越突出，无线光通信是一种实现接入网的新兴技术。该技术具有建网速度快、成本低、可剪动性强和高宽带等优点，使其在宽带接入场景中有很强的竞争力，但因受信道环境的影响较大，对其稳定性及相关补偿技术还需进一步深入研究。

本书是对该领域现阶段相关技术的有机融合。全书共十章，涉及相干光通信、信号的编码调制、信道传输特性及均衡、捕获对准跟踪、白光 LED 通信、水下激光通信，并对部分相干光传输的原理及未来通信技术做了详细的介绍。

本书是作者在西安理工大学讲授“无线光通信”课程的基础上完成的，感谢学校对我们工作的支持。西安理工大学光电工程技术研究中心的研究生对书中的内容进行丁仔细的讨论，使本书的编写体系得以不断完善，教师邓莉君参与了本书部分章节的撰写及校正工作，对本课题的研究也有很大贡献。

本书的工作得到国家自然科学基金面上项目（61377080）、陕西省科技统筹创新工程计划项目、陕西省教育厅教学改革项目（15BY34）、通信工程陕西普通本科高等学校“专业综合改革试点”、通信工程特色专业建设、通信工程专业核心课程教学团队等项目和基金的资助。

本书是我们进行无线光通信研究工作的总结，由于水平有限，书中难免存在不妥之处，欢迎读者不吝指正。

目 录

前言

第 1 章 无线光通信系统	1
1.1 无线光通信模型	1
1.1.1 发射机	1
1.1.2 接收机	2
1.1.3 信道	2
1.2 激光光源	3
1.2.1 半导体激光器的工作原理	3
1.2.2 半导体激光器的基本特性	4
1.2.3 非线性校正	5
1.3 信号检测	7
1.3.1 直接检测	7
1.3.2 直接检测极限	8
1.4 光放大器	9
1.4.1 光放大器的分类	9
1.4.2 掺铒光纤放大器	10
1.4.3 半导体光放大器	11
1.5 空间光-光纤耦合技术	11
1.5.1 单透镜耦合	11
1.5.2 阵列耦合	13
1.5.3 特种光纤耦合	13
1.6 光学天线与望远镜	14
1.6.1 折射式望远镜	14
1.6.2 反射式望远镜	14
1.6.3 折反射望远镜	15
1.6.4 收发一体化光学天线	16
1.7 总结与展望	16
思考题一	17
习题一	17
参考文献	21

第 2 章 相干光通信	23
2.1 相干光通信的基本原理	23
2.1.1 基本原理	23
2.1.2 零差探测	25
2.1.3 外差探测	26
2.1.4 调幅信号的外差探测	26
2.1.5 双平衡探测	27
2.2 相干调制与解调	28
2.2.1 相干系统的光调制	28
2.2.2 相干解调	30
2.2.3 系统性能	33
2.3 影响检测灵敏度的因素	34
2.3.1 相位噪声	34
2.3.2 强度噪声	34
2.3.3 偏振噪声	35
2.3.4 相干光通信系统的关键技术	35
2.4 光外差检测的空间相位条件	35
2.4.1 空间相位条件	35
2.4.2 光外差检测的频率条件	38
2.4.3 光外差检测的偏振条件	39
2.5 总结与展望	39
思考题二	39
习题二	40
参考文献	43
第 3 章 调制、解调与编码	44
3.1 调制技术	44
3.1.1 基本概念	44
3.1.2 模拟调制与数字调制	45
3.1.3 直接调制与间接调制	45
3.1.4 内调制与外调制	45
3.2 外调制技术	46
3.2.1 电光调制	46
3.2.2 声光调制	50
3.2.3 磁光调制	52
3.3 逆向调制	54

3.3.1 “猫眼”效应	54
3.3.2 逆向调制原理	55
3.3.3 “猫眼”逆向调制系统	57
3.4 类脉冲位置调制	58
3.4.1 类脉冲位置调制原理	58
3.4.2 同步技术	63
3.5 光源直接驱动	64
3.5.1 单端转差分部分	65
3.5.2 电平调整部分	65
3.5.3 激光器驱动部分	66
3.5.4 光反馈原理	69
3.6 副载波强度调制	70
3.6.1 副载波强度调制原理	71
3.6.2 BPSK 副载波调制	71
3.6.3 FSK 副载波调制	73
3.6.4 互调失真与载噪比	75
3.7 正交频分复用	77
3.7.1 基本原理	77
3.7.2 OFDM 中离散傅里叶变换实现	80
3.7.3 保护间隔和循环前缀	82
3.7.4 峰均功率比及其降低方法	83
3.8 空时编码	83
3.8.1 空时编码的演变	84
3.8.2 无线光通信中的空时编码	86
3.8.3 无线光通信中的空时译码	87
3.9 信道编码	88
3.9.1 信道编码及其分类	88
3.9.2 线性纠错码	88
3.9.3 卷积码	89
3.10 总结与展望	92
思考题三	92
习题三	92
参考文献	95
第 4 章 大气信道、信道估计与信道均衡	98
4.1 大气衰减效应	98

4.1.1	大气衰减系数与透过率	98
4.1.2	大气分子吸收与散射	99
4.1.3	大气气溶胶粒子吸收与散射	100
4.1.4	大气窗口	100
4.1.5	衰减系数估算	101
4.1.6	传输方程	102
4.2	大气湍流模型	102
4.2.1	大气湍流	103
4.2.2	大气湍流信道模型	104
4.2.3	Log-normal 湍流模型	104
4.2.4	Gamma-Gamma 湍流模型	107
4.2.5	负指数分布湍流模型	110
4.2.6	大气结构常数	112
4.2.7	大气湍流引起的误码率	113
4.3	分集接收	114
4.3.1	最大比合并	114
4.3.2	等增益合并	115
4.3.3	选择合并	115
4.4	信道估计	115
4.4.1	信道估计的概念	115
4.4.2	最小二乘信道估计算法	116
4.4.3	MMSE 准则的信道估计	117
4.5	信道均衡	117
4.5.1	码间干扰与信道均衡	117
4.5.2	时域均衡	118
4.5.3	线性均衡	119
4.6	总结与展望	121
	思考题四	121
	习题四	121
	参考文献	125
第 5 章	白光 LED 通信	127
5.1	LED 发光原理	127
5.1.1	白光 LED	127
5.1.2	LED 发光原理	127
5.1.3	白光 LED 发光原理	128

5.1.4 白光 LED 发光模型	129
5.2 光源最优化布局	130
5.3 室内可见光信道	132
5.4 接收机与检测技术	134
5.4.1 接收机前端	135
5.4.2 接收阵列设计	137
5.5 可见光通信的上行链路	137
5.5.1 射频上行链路	138
5.5.2 红外光上行链路	138
5.5.3 激光上行链路	138
5.5.4 可见光上行链路	138
5.6 可见光通信定位技术	139
5.6.1 光信号接收强度定位法	139
5.6.2 指纹识别定位法	139
5.6.3 LED 标签 (LED-ID) 定位法	139
5.6.4 可见光成像定位技术	140
5.7 总结与展望	140
思考题五	140
习题五	140
参考文献	142
第 6 章 水下激光通信	145
6.1 水下激光通信概述	145
6.2 水下激光通信系统	146
6.2.1 水下激光通信原理	146
6.2.2 水下信道	146
6.2.3 水下激光通信的特点	147
6.3 激光对潜通信	147
6.3.1 激光对潜通信的形式	147
6.3.2 各介质层的传输	148
6.3.3 时间扩展	150
6.3.4 能量方程	150
6.3.5 激光对潜通信的发展趋势	151
6.4 总结与展望	151
思考题六	151
习题六	151

参考文献	152
第 7 章 紫外光通信	153
7.1 紫外光及其信道特性	153
7.1.1 紫外光	153
7.1.2 紫外光的特点	153
7.1.3 紫外光大气信道	154
7.1.4 紫外光大气信道特性	155
7.2 紫外光非直视传输特性	157
7.2.1 椭球坐标系	157
7.2.2 紫外光散射通信的过程	158
7.2.3 非直视散射特性	159
7.3 日盲紫外光非直视通信组网	160
7.3.1 无线 Mesh 通信网络	160
7.3.2 无线紫外光 Mesh 通信网络	162
7.4 总结与展望	163
思考题七	163
习题七	163
参考文献	164
第 8 章 捕获、瞄准和跟踪技术	165
8.1 APT 系统	165
8.1.1 APT 的概念	165
8.1.2 APT 的工作原理	166
8.2 自动捕获	167
8.2.1 开环捕获模式	168
8.2.2 扫描方式	169
8.2.3 捕获单元性能指标	173
8.3 自动跟踪	174
8.3.1 跟踪系统	174
8.3.2 复合轴控制系统	175
8.3.3 粗跟踪单元精度分析	175
8.3.4 精跟踪光束伺服单元	176
8.4 总结与展望	176
思考题八	177
习题八	177
参考文献	177

第 9 章 部分相干光传输	179
9.1 光束的基本参数	179
9.1.1 发射光束	179
9.1.2 互相干函数	180
9.1.3 光束的扩展、漂移与强度起伏	184
9.2 部分相干光模型	185
9.2.1 部分相干光描述	185
9.2.2 部分相干光波束	187
9.3 光束在大气湍流中的传输	189
9.3.1 光束的扩展与漂移	189
9.3.2 水平传输光束的漂移与扩展	194
9.3.3 斜程传输光束的漂移与扩展	197
9.3.4 到达角起伏	200
9.3.5 光束漂移与扩展对通信系统的影响	203
9.4 总结与展望	205
思考题九	205
习题九	205
参考文献	208
第 10 章 未来的通信技术	210
10.1 X 射线空间通信	210
10.1.1 X 射线通信背景	210
10.1.2 X 射线通信系统	210
10.1.3 发展方向与展望	214
10.2 自由空间光量子通信	215
10.2.1 量子与量子通信	215
10.2.2 量子态及其表征	215
10.2.3 量子通信系统	216
10.2.4 轨道角动量复用	221
10.2.5 发展方向与展望	221
10.3 中微子通信	222
10.3.1 中微子	222
10.3.2 中微子通信原理	222
10.3.3 中微子通信系统	222
10.3.4 中微子通信的关键技术	223
10.3.5 中微子通信的特点	224

10.4 引力波通信	224
10.4.1 引力波的探测	224
10.4.2 引力波的产生	227
10.4.3 引力波探测的主要困难	227
10.5 太赫兹波通信	227
10.5.1 太赫兹波及其优点	227
10.5.2 太赫兹波发射天线	228
10.5.3 太赫兹波探测器	230
10.5.4 太赫兹波调制器	231
10.5.5 太赫兹波在大气中的传输	232
10.6 总结与展望	232
思考题十	232
习题十	233
参考文献	233

第 1 章 无线光通信系统

无线光通信融合了光纤通信与微波通信的优点，通信容量大又不需要铺设光纤，也无须频谱许可。本章介绍无线光通信系统的模型以及基本概念。

1.1 无线光通信模型

无线光通信端机由光学天线（望远镜）、激光收发器、信号处理单元、自动跟瞄系统等部分组成。发送器的光源采用 LD（激光二极管）或 LED（发光二极管），接收器主要采用 PIN 或雪崩二极管（Avalanche Photo Diode, APD）。无线光通信模型如图 1.1 所示。

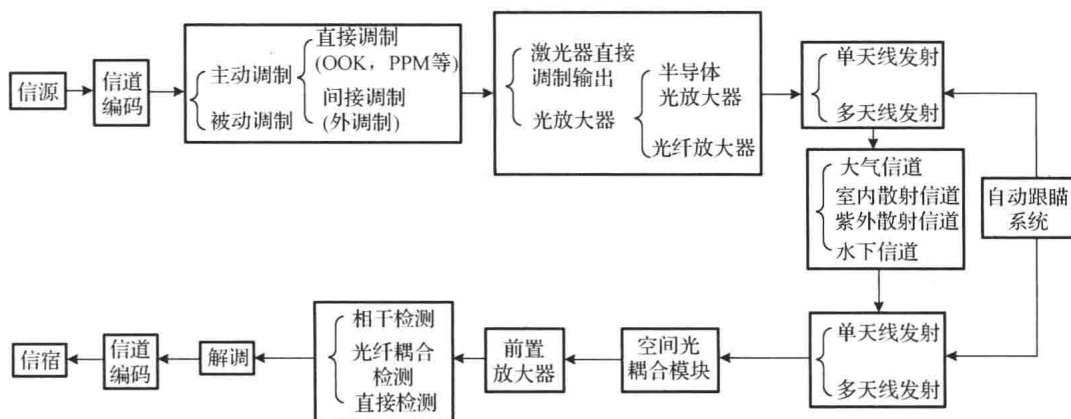


图 1.1 无线光通信模型

1.1.1 发射机

由信源产生的某种形式的信息（如时变的波形、数字符号等）调制到光载波上，载波（称为光束或光场）通过大气或自由空间发射出去，这就是发射机。发射机包括信道编码、信源编码、调制、光信号放大以及发射天线。

信道编码的过程是在源数据码流中加插一些冗余码元，从而达到在接收端进行判错和纠错的目的。降低误码率是信道编码的基本任务。信道编码的本质是增加通信的可靠性，但由于加入了冗余而使有用的信息数据传输率减少。

调制是信号的变换过程，是按编码信号的特征改变光信号的某些特征值（如振幅、

频率、相位等) 并使其发生有规律(这个规律是由信源信号本身的规律所决定的) 的变化。这样光信号就携带了信源信号的相关信息。

调制可以分为主动调制与被动调制。如果光源和调制信号同在发射端, 则称为主动调制; 如果光源和调制信号不在同一端, 则称为被动调制, 也称为逆向调制。对激光器光源进行调制称为直接调制; 对激光器发出的波束进行调制称为间接调制, 也称为外调制。

如果通信距离要求较远, 激光器直接输出的光功率不足, 则采用光放大器对光信号进行放大。光放大器有半导体光放大器和光纤放大器。

发射天线有多天线发射/多天线接收、单天线发射/单天线接收。多天线发射/多天线接收可以抑制大气湍流的影响。

1.1.2 接收机

接收机包括光信号收集天线、空间光-光纤耦合单元、前置放大器、检测器、解调器等。

接收天线把发射机发送的光信号收集起来, 空间光-光纤耦合是将接收机收集的信号光耦合进光纤中, 由光纤探测器实现光电转换。光信号耦合进光纤的过程中会有能量损失。

有时耦合进光纤的信号非常微弱, 需要采用前置光放大器对其进行预先放大后再进行光电转换, 这个放大器就是前置放大器。

信号检测有探测器直接检测、空间光-光纤耦合检测、分布式检测以及相干检测。光检测器直接接收天线汇集光信号的检测方式称为直接探测。将空间光耦合进光纤中, 由光电检测器检测光纤中的信号, 这就是空间光-光纤耦合检测。由于光纤端面小, 光电转换器感光面积小, 需要的光信号强度也小, 因此空间光-光纤耦合检测的速率高, 检测灵敏度也高^[1]。

1.1.3 信道

无线光信道包括大气信道、室内信道、紫外光散射信道和 underwater 信道。大气信道是最复杂的信道, 大气湍流及复杂气象条件对光信道影响最大。信道传递函数可以表示为

$$H(f) = H_T(f)H_c(f)H_r(f) \quad (1.1)$$

式中, $H_T(f)$ 、 $H_c(f)$ 和 $H_r(f)$ 分别表示发射机、信道和接收机的传递函数。对应的时域表达式为

$$h(f) = h_T(f)h_c(f)h_r(f) \quad (1.2)$$

式中, $h_T(t)$ 、 $h_c(t)$ 和 $h_r(t)$ 分别表示发射机、信道和接收机的单位冲激响应。信道模型如图 1.2 所示。

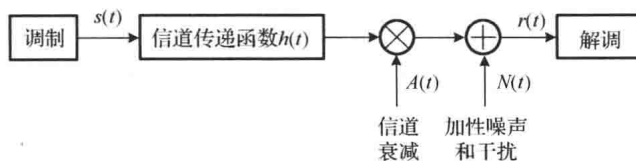


图 1.2 信道模型

解调器输入的信号可以表示为

$$r(t) = A(t)[s(t) * h(t)] + n(t) \quad (1.3)$$

式中， $A(t)$ 表示信道的衰落； $s(t)$ 是调制器输出的信号； $*$ 表示卷积。对于大气激光通信， $A(t)$ 主要来源于大气湍流；对于紫外光非直视通信， $A(t)$ 主要由大气分子对紫外光的单次散射以及多次散射产生光强的起伏；对于室内可见光通信， $A(t)$ 主要由室内光的反射产生。当不考虑信道衰落的时候，接收信号可以表示为

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (1.4)$$

式中， $n(t) \sim (0, \sigma^2)$ ，是加性高斯分布的白噪声，一般表示接收机探测器及其附属电路的电子噪声。

1.2 激光光源

半导体激光器（Semiconductor Laser）是一种能够直接将电能转化为光的固态半导体器件。其他激光器如气体激光器、液体激光器也可以作为光源，但以半导体激光器最为常见。

1.2.1 半导体激光器的工作原理

半导体激光器是用半导体材料作为工作物质的发光器件。常用工作物质有硫化镉（CdS）、砷化镓（GaAs）、磷化铟（InP）、硫化锌（ZnS）等。工作物质结构上的差异导致产生激光的具体过程会有不同。激励方式有电子束激励、电注入和光泵浦三种形式。半导体激光器可分为单异质结、双异质结、同质结等几种。同质结激光器和单异质结激光器在室温时多为脉冲器件，而双异质结激光器在室温时可实现连续工作。半导体激光器的基本结构是双异质结平面条形结构，如图 1.3 所示。所谓异质结，是指由两种带隙宽度不同的半导体材料组成的 PN 结（也可能是 PP 或 NN 结）。普通 PN 结也称为同质结^[2]。

粒子数反转（population inversion）是激光产生的前提。两能级间受激辐射的概率与两能级粒子数差有关。通常处于低能级（ E_1 ）的原子数大于处于高能级（ E_2 ）的原子数，这种情况下不产生激光。要产生激光就必须使高能级（ E_2 ）上的原子数大于低能级（ E_1 ）上的原子数，因为高能级（ E_2 ）上的原子多而发生受激辐射，从而导致光

增强（也称光放大）。为了达到这个目的，必须设法把处于基态的原子大量激发到亚稳态（ E_2 ），处于高能级（ E_2 ）的原子数就可以大大超过处于低能级（ E_1 ）的原子数。这样就在两个能级之间实现了粒子数反转。

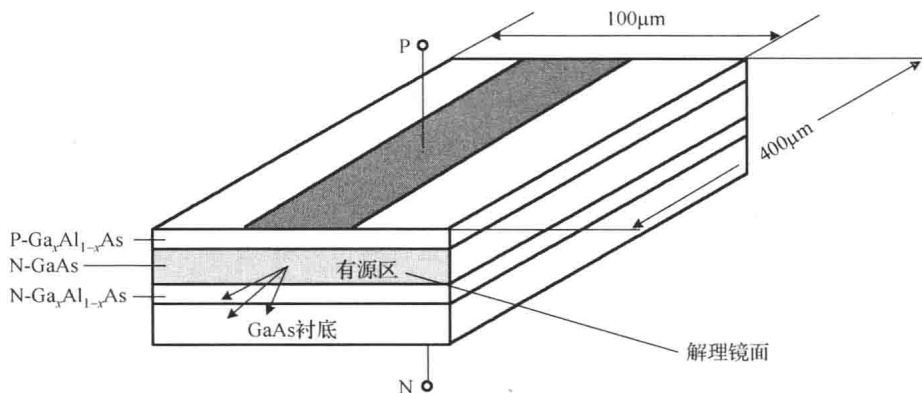


图 1.3 双异质结平面条形半导体激光器的基本结构

激光器要产生激光必须有增益介质、谐振腔和泵浦源，在一定条件下才可以产生激光。同质结半导体激光器对半导体材料的要求是重掺杂而且必须是“直接带隙”的半导体材料。电子由导带跃迁至价带，受激辐射将起主导作用，发出的光就是激光。由于重掺杂，简并半导体的有源区束缚电子和空穴的能力较弱，需要很大的注入电流密度才能实现粒子数反转，所以难以实现室温下连续工作，只能在低温下工作。为了降低电流密度阈值，人们研究了单异质结和双异质结半导体激光器。不同半导体材料的带隙差也使有源区的折射率高于邻近的介质，这样使光子也限制在有源区内，载流子和光子的束缚使得激光器的阈值电流密度大幅度下降，从而实现了室温连续工作。

1.2.2 半导体激光器的基本特性

半导体激光器是以一定的半导体材料为工作物质而产生受激发射作用的器件。其工作原理是通过一定的激励方式，在半导体物质的能带（导带与价带）之间，或者半导体物质的能带与杂质（受主或施主）能级之间，实现非平衡载流子的粒子数反转。当处于粒子数反转状态的大量电子与空穴复合时，便产生受激发射作用^[3]。半导体激光器的激励方式主要有三种：电注入式、光泵式和高能电子束激励式。电注入式半导体激光器一般是由 GaAs、CdS、InP、ZnS 等材料制成的半导体面结型二极管，沿正向偏压注入电流进行激励，在结平面区域产生受激发射；光泵式半导体激光器一般以 N 型或 P 型半导体单晶（如 GaAs、InAs、InSb 等）为工作物质，以其他激光器发出的激光作光泵激励；高能电子束激励式半导体激光器以 N 型或者 P 型半导体单晶（如 PbS、CdS、ZnO 等）为工作物质，通过由外部注入高能电子束进行激励。半导体激光器是阈值器件，当注入电流小于阈值电流时，谐振腔增益不足以克服损耗，有源区内

不能实现粒子数反转, 自发辐射占主导地位, 发出普通的荧光, 与 LED 相似; 随着注入电流增大, 达到阈值后, 有源区内实现了粒子数反转, 受激辐射占主导地位, 发出谱线尖锐、模式明确的激光。半导体激光器对温度很敏感, 其输出功率随温度变化很大, 其原因主要是半导体激光器的外微量子效率和阈值电流都随温度而变化。

半导体激光器除了具有激光器的共同特点外, 还具有以下特点: 体积小, 重量轻, 驱动功率和电流较低, 效率高, 工作寿命长, 可直接电调制, 易于与各种光电子器件实现光电子集成。

1.2.3 非线性校正

激光器是具有阈值特性的非线性器件, 其非线性会在调制信号的激励下产生谐波失真。

1. 静态非线性对副载波调制的影响

利用输入电流与输出光功率之间关系的 $I-L$ 特性曲线可以用来表征激光器的非线性失真。如图 1.4 所示, 非线性失真可以简单地概括为在无失真信号的激励下, 输出响应信号在时域中产生了波形畸变, 在频域中则出现了新的谐波分量。

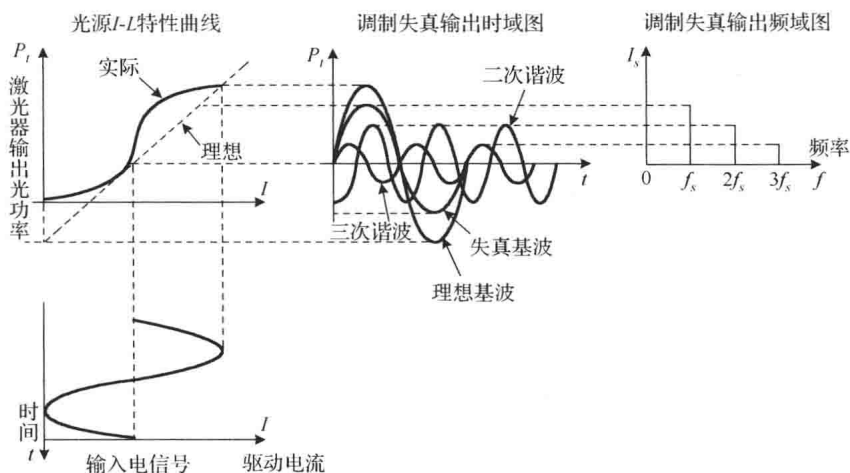


图 1.4 激光器非线性对副载波调制的影响

2. $I-L$ 特性预失真补偿

假设激光器输出光功率与驱动电流的关系为

$$P = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + a_3 I^3 \quad (1.5)$$

假设预失真器产生的预失真信号为

$$I' = b_2 I^2 + b_3 I^3 \quad (1.6)$$