

信号与信息处理
技术丛书

光纤通信与 空间光通信技术



YZLI0890169607

王佳 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

信号与信息处理技术丛书

光纤通信与空间光通信技术

王佳 编著



YZLI0890169607

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书结合光纤通信技术和空间光通信技术目前的发展动态,全面介绍了以光为载波的通信系统的基本概念、原理、技术以及系统设计方法,上篇主要内容包括:光纤通信系统的优点及组成;光源器件的结构、发光原理、调制原理及编码技术;光检测器件的结构和原理,光接收机的相关理论;光纤的传输原理和特性,光纤的非线性效应;光无源器件和光放大器的原理与应用;光纤通信系统性能指标与光网络技术。下篇主要内容包括:空间光通信技术的发展现状及关键技术;空间光通信系统的功率预算;各部分的方案设计;地面水平空间光通信系统的样机设计;空间光通信系统保密性能的研究及光脉冲展宽问题的研究。

本书可作为电子科学与技术、通信工程专业本科生及相关专业的高年级学生使用,也可作为通信技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信与空间光通信技术 / 王佳编著. —北京:电子工业出版社,2013.2
(信号与信息处理技术丛书)

ISBN 978-7-121-19461-0

I. ①光… II. ①王… III. ①光纤通信 ②光通信 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第013872号

责任编辑:董亚峰 特约编辑:王 纲

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:14.25 字数:365千字

印 次:2013年2月第1次印刷

定 价:35.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序 言

人类利用光来进行通信有悠久的历史。最早人们用手势、眼神进行沟通，这是最朴素的光通信应用：手势和眼神作为信源发出信息，光线携带信息从发送者到达接收者，接收者的眼睛是光通信系统的信宿。这是一种目视形式的光通信系统，传输速度和传输距离都很有限。

后来人们利用烟火进行信息传输，大大延长了通信距离，“烽火戏诸侯”的典故成为光通信系统最著名的古代应用案例，并且启发了近代军事上的“旗语”、“灯语”等简单的光通信系统。事实上，路口的红绿灯和汽车转向灯等都是光通信系统，推而广之，任何类型的指示灯都是简单的光通信系统。

1880年，贝尔制作了一台“光电话”，利用太阳光传送语音信息，把光束通过透镜聚焦在话筒的薄膜振动镜片上，当人对着话筒说话时，振动镜随着语音振动，从而使反射光的强度随着语音的变化而变化，即反射光被语音所调制，传送到接收端的光波就是已调光波。接收端是一面抛物面反射镜，把传送来的已调光波反射到硒光电池上，将光能转变成电流，把电流送到听筒就恢复成语音信号，实现了距离达到213m的语音通信。

贝尔自认为光电话是他一生最伟大的发明，但是由于当时各种技术条件的限制，没有理想的光源和传输介质，这样短距离的语音通信实用意义不大；在之后的一段漫长时间里，光通信几乎没有进展，光电话只是证明了利用光作为载波传递信息的可能性。

1960年，美国科学家梅曼发明了红宝石激光器，它发出的光与普通光相比，谱线很窄，方向性极好，亮度极高，是非常理想的光载波。因此，激光器的诞生使光通信进入了一个崭新的阶段。

激光英文名称是LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)，中文曾译为“莱赛光”，意思为“受激辐射的光放大”。它是一种频率和相位都一致的相干光，特性与无线电波相似，而频率比无线电波高得多。今天用于光通信的光频率一般为 10^{14}Hz ，比频率为 10^{10}Hz 的微波和频率为 10^{11}Hz 的毫米波高几个数量级，如图0-1所示。

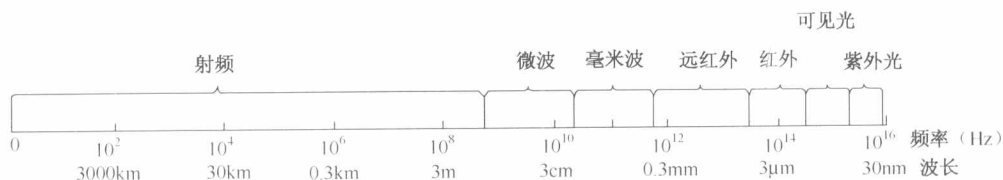


图0-1 电磁波谱

激光的出现极大地增加了通信容量，从而很快在通信领域得到了应用。在红宝石激光器发明后不久，各种不同材料的激光器相继诞生，如氦氖激光器、二氧化碳激光器等。随后，麻省理工学院模拟无线电通信进行了激光大气通信实验，结果表明：在天气晴朗的条

件下，激光通信稳定可靠，而且通信距离较长；但是在不良天气下，通信不稳定甚至会中断。不能“全天候”通信是一个合格的通信系统所不允许的，所以大气作为光传输介质的致命弱点就是“靠天吃饭”，这严重地影响了它的发展。

激光大气通信不稳定的原因很多，主要原因是光在大气中传输受到大气层气候条件的影响，光能量损失严重。例如，霾、雾、雨、雪、灰尘对光能量的吸收和散射，使光波在传输过程中能量迅速衰减，严重影响通信的稳定性和可靠性；另外，飞鸟等飞行物也会阻挡光的传播。由此可见，光在大气层中的传输是很不利的，激光大气通信不是适合长距离、大容量的理想通信方式。

1965 年左右，光通信的研究进入低潮，有的国家甚至宣布激光大气通信是一条“死胡同”。正在此时，英籍华人高锟认为如果电可以沿着导电的金属导线远距离传输，那么光也应该可以沿着导光的玻璃纤维传输，于是他提出大胆的假设——低损耗光导纤维的概念，高锟因此获得 2009 年诺贝尔物理学奖。当时最好的玻璃损耗大约为 1000dB/km（即光沿着光纤传输 1km 后，能量衰减为原来的 $1/10^{10}$ ）。高锟认为只要去除玻璃中的杂质，使光损耗尽可能减少，则完全可能生产出具有实用意义的低损耗光纤。美国康宁公司的研究小组经过大量的研究和实验，终于在 1970 年 8 月研制出损耗为 20dB/km（即光沿着光纤传输 1km 后，能量衰减为原来的 $1/100$ ）的石英光纤，其直径只有头发丝大小，并且柔软可弯曲。它的出现解决了大气干扰的问题，是一种理想的传输介质。

就在同一年，美国贝尔实验室研制成功室温下连续振荡的半导体激光器。与气体激光器相比，半导体激光器体积小，功耗低，可直接电流调制，使用方便，为光纤通信的发展提供了理想的光源。经过几年的发展，克服了器件严重发热、寿命太短等缺陷，在 1977 年研制成功了室温下连续振荡 100 万小时的 GaAlAs 半导体激光器。随即，各种光纤通信系统如雨后春笋般发展起来。到了 1980 年，美国、日本先后推出商用的光纤通信系统。

但是，利用激光在空间传输信息仍然有巨大的吸引力，随着适用于空间应用的先进通信电子设备的研究越来越成熟，20 世纪末期空间光通信又重新成为研究热点，并且在应急通信、卫星通信、本地网接入、军事通信等领域有广阔的应用前景，许多国家都投入大量人力和物力开展研究。

本书围绕以光为载波的通信技术，讲述光信号的检测与处理。全书分上、下两篇，上篇为光纤通信技术，下篇为空间光通信技术。

前 言

以光为载波的通信系统具有巨大的信息传输容量，一条光链路理论上可以容纳几十亿人同时通话。以光为载波进行通信有两种方式：光纤通信和空间光通信，两者的区别在于：光纤通信的通信链路是封闭在光纤中的，而空间光通信的通信链路是开放的。由于历史的原因，光纤通信技术已经发展得比较成熟，空间光通信技术相对起步较晚，但是也发展迅速。相信未来以光为载波的通信将继续发展，把通信技术从电到光推向更高的台阶。

全书分为上、下两篇，上篇为光纤通信技术，包括第 1 章至第 6 章；下篇为空间光通信技术，包括第 7 章至第 12 章。第 1 章为光纤通信技术部分的引言，主要介绍光纤通信系统的优点和系统组成；第 2 章为光源与光发射机，介绍激光的发光原理，半导体激光器和发光二极管的结构和工作特性，以及光源的调制和编码方法；第 3 章为光电探测器与光接收机，介绍了 PIN 光电二极管和雪崩光电二极管的原理、结构和特性，在介绍光接收机的主要组成部分的电路结构和工作特性的基础上，讨论光接收机的噪声、信噪比、误码率和灵敏度；第 4 章主要介绍光纤的传输原理与传输特性，包括光纤的结构、分类、导光原理、损耗、色散以及非线性效应；第 5 章介绍几种常用的光无源器件的作用、工作原理和种类，包括光纤连接器、光开关、光耦合器、光隔离器和光衰减器，然后介绍光放大器的概念、几种典型光放大器原理与应用；第 6 章为光纤通信系统与光网络，介绍光纤损耗和色散对系统性能的影响，以及两种数字传输体制、系统性能指标，介绍波分复用技术、光时分复用技术以及接入网技术；第 7 章为空间光通信技术部分的引言，主要介绍了空间光通信技术的应用和发展现状，以及关键技术和发展趋势；第 8 章为空间光通信系统的功率预算，分别介绍了星际的、地面水平以及斜程空间光通信系统的功率预算，以及信噪比与误码率；第 9 章为空间光通信系统的方案设计，包括光源、探测器、光学天线、ATP 系统的设计，以及光信号的调制原理与技术；第 10 章为地面水平空间光通信系统样机设计，介绍激光器驱动电路、光接收电路、以太网模块和光学天线的设计以及测试结果；第 11 章讨论空间光通信信号被截获的可能性；第 12 章讨论空间光通信系统的脉冲展宽问题，提出采用低精度大口径非成像光学元件。

本书的第 10 章主要由周燕博士完成，在此表示深深的感谢。

为保证本书理论部分的系统性，编者参考了相关领域出版的部分著作和教材，同时引用了一些文献中发表的内容，它们使得本书能够反映光纤通信技术和空间光通信技术发展的当前水平。在此，对这些成果的作者表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限、经验不足，加之时间仓促，书中难免存在错漏之处，敬请读者批评指正。

编著者
2013 年 1 月

目 录

上篇 光纤通信技术

第 1 章 引言	3
1.1 光纤通信系统的优点	3
1.2 光纤通信系统的基本组成	5
第 2 章 光源与光发射机	8
2.1 激光的发光原理	8
2.1.1 原子的能级结构	8
2.1.2 光与物质的相互作用	9
2.1.3 半导体材料的能带结构	10
2.1.4 PN 结的能带	11
2.2 LD 的工作特性	13
2.2.1 功率—电流特性	13
2.2.2 转换效率	14
2.2.3 温度特性	15
2.2.4 光谱特性	15
2.2.5 方向性	17
2.2.6 暂态特性	17
2.3 发光二极管的结构和特性	19
2.3.1 发光二极管的结构	19
2.3.2 发光二极管的工作特性	20
2.4 光源的内调制	21
2.4.1 LED 的模拟调制	21
2.4.2 LED 的数字调制	22
2.4.3 LD 的模拟调制	23
2.4.4 LD 的数字调制	23
2.5 光源的外调制	24
2.5.1 电光强度调制	24
2.5.2 光波导调制	26
2.6 脉冲编码	28
2.6.1 曼彻斯特编码	28
2.6.2 CMI 码	29

2.6.3	<i>mBnB</i> 码	29
第 3 章	光电探测器与光接收机	31
3.1	光电探测器	31
3.1.1	PIN 光电二极管	32
3.1.2	雪崩光电二极管	34
3.2	光接收机	36
3.2.1	光接收机的结构	37
3.2.2	光接收机的噪声	40
3.2.3	光接收机的信噪比	41
3.2.4	光接收机的误码率	42
3.2.5	光接收机的灵敏度	44
第 4 章	光纤	46
4.1	光纤概述	46
4.2	光纤的传输原理	49
4.2.1	几何光学法	49
4.2.2	波动光学法	52
4.3	光纤的损耗特性	56
4.3.1	紫外吸收	57
4.3.2	红外吸收	57
4.3.3	散射损耗	57
4.3.4	金属元素吸收	58
4.3.5	氢氧根吸收	58
4.3.6	辐射损耗	59
4.4	光纤的色散与带宽	59
4.4.1	模式色散	61
4.4.2	材料色散	62
4.4.3	波导色散	63
4.4.4	偏振色散	63
4.5	光纤的非线性效应	64
4.5.1	非线性折射率	65
4.5.2	非线性受激散射	66
第 5 章	光无源器件和光放大器	68
5.1	光纤连接器	68
5.1.1	光纤固定连接方式	69
5.1.2	光纤活动连接方式	70
5.2	光开关	72
5.2.1	机械式光开关	73

5.2.2	电光开关	74
5.2.3	液晶光开关	74
5.2.4	磁光开关	75
5.2.5	热光开关	76
5.2.6	微机电光开关	77
5.3	光耦合器	79
5.3.1	光耦合器的特征参数	79
5.3.2	光耦合器的拓扑结构	80
5.4	光隔离器	81
5.5	光衰减器	82
5.6	光放大器	83
5.6.1	稀土掺杂光纤放大器	84
5.6.2	拉曼光纤放大器	86
5.6.3	半导体光放大器	88
第6章	光纤通信系统与光网络	90
6.1	光纤损耗和色散对系统性能的影响	90
6.1.1	损耗限制系统	90
6.1.2	色散限制系统	91
6.2	光纤通信系统的功率预算和上升时间预算	92
6.3	光数字传输网	93
6.4	数字光纤通信系统的性能指标	95
6.4.1	误码性能	95
6.4.2	抖动性能	97
6.5	波分复用技术	97
6.5.1	WDM 基本原理	98
6.5.2	WDM 系统的核心技术	98
6.6	光时分复用技术	100
6.7	接入网技术	100

下篇 空间光通信技术

第7章	引言	105
7.1	概述	105
7.2	空间光技术的应用和发展现状	106
7.2.1	星际空间通信应用	106
7.2.2	地面商用通信应用	107
7.2.3	军事通信应用	109
7.3	关键技术	111
7.3.1	精密、可靠的光束控制技术	111

7.3.2	高灵敏度和高抗干扰性的光信号接收技术	112
7.3.3	快速、精确的 APT 技术	112
7.3.4	大气信道的研究	112
7.3.5	调制和编、解码方式研究	112
7.4	发展趋势	113
第 8 章	空间光通信系统的功率预算	114
8.1	简化的功率预算公式	114
8.2	星际空间光通信系统的功率预算	114
8.2.1	高斯光束	115
8.2.2	光束抖动	115
8.2.3	功率预算	116
8.3	地面水平空间光通信系统的功率预算	118
8.3.1	大气衰减	119
8.3.2	大气湍流	124
8.3.3	湍流大气中的光强闪烁	126
8.3.4	湍流大气中的光束漂移	127
8.3.5	湍流大气中的光束扩展	128
8.3.6	功率预算	129
8.4	斜程空间光通信系统的功率预算	133
8.5	空间光通信系统的信噪比与误码率	136
8.5.1	信噪比	137
8.5.2	误码率	139
第 9 章	空间光通信系统方案设计	143
9.1	光源	143
9.1.1	半导体激光器	143
9.1.2	主振功放	145
9.1.3	光纤激光器	146
9.1.4	Nd:YAG 激光器	147
9.2	探测器	147
9.3	光学天线	149
9.3.1	离轴式牛顿望远系统	149
9.3.2	卡塞格林望远系统	150
9.3.3	离轴式格里高利望远系统	150
9.3.4	附加透镜式卡塞格林望远系统	150
9.3.5	附加施密特校正板式卡塞格林望远系统	151
9.3.6	马克斯托夫—卡塞格林望远系统	151
9.4	APT 系统	152
9.4.1	捕获系统	153
9.4.2	跟踪系统	155

9.5	光信号调制原理与技术	159
9.5.1	开关键控调制	160
9.5.2	脉冲位置调制	160
9.5.3	数字脉冲间隔调制	161
9.5.4	几种调制方式的性能比较	162
第 10 章	地面水平空间光通信系统样机设计	164
10.1	主要技术指标与器件	164
10.2	系统的结构	165
10.3	激光器驱动电路	167
10.3.1	直接光强度调制	167
10.3.2	激光器驱动电路设计	168
10.3.3	驱动电路外围电路设计及取值	169
10.3.4	电路设计中需要注意的若干问题	170
10.3.5	实验测试结果及分析	171
10.4	光接收电路	172
10.4.1	前置放大器	173
10.4.2	限幅放大器	174
10.4.3	接收电路设计	176
10.4.4	电路设计中需要注意的若干问题	176
10.4.5	实验测试	177
10.5	以太网接口模块	178
10.5.1	媒体转换器 IP113 的内部结构	178
10.5.2	IP113 外围电路设计	180
10.5.3	实验测试	182
10.6	光学天线	183
10.6.1	光学天线的结构	183
10.6.2	天线效率以及准直发散角的实验测试	184
10.7	空间光通信链路功率预算	185
10.8	空间光通信系统测试	185
10.8.1	基于视频处理的空间光通信	186
10.8.2	基于以太网传输的空间光通信	187
第 11 章	空间光通信的保密性能	190
11.1	概述	190
11.2	空间光通信信号被截获的可能性	190
11.2.1	在信道外截获散射光信号的理论模型	190
11.2.2	散射区域的限制条件	194
11.2.3	计算实例	196

第 12 章 空间光通信系统中脉冲展宽问题的研究	199
12.1 概述	199
12.2 大气色散	199
12.2.1 大气色散对单纵模激光器产生的光脉冲的影响	200
12.2.2 大气色散对多纵模激光器产生的光脉冲的影响	202
12.3 大气扰动的影响	205
12.4 光学系统的影响	206
12.5 采用低精度大口径非成像光学元件的研究	209
12.5.1 采用大口径光学接收天线的原因	209
12.5.2 几种典型非成像光学元件的仿真计算	210
参考文献	216



上篇

光纤通信技术

第1章 引言

1.1 光纤通信系统的优点

光纤通信与电波通信相比，区别主要有两点：一是以光为载波，二是以光纤作为传输介质。基于以上两点，光纤通信有以下的优点。

1. 传输容量大

人们对通信容量的要求越来越大，不断地提高载波频率来扩大通信容量，有线通信从明线发展到电缆，无线通信从短波向微波和毫米波扩展。然而光频约为 3.5×10^{14} Hz（波长为 850nm 时），比无线通信高几个数量级，所以光纤通信的容量比无线通信大得多。如果充分利用光纤通信的带宽，假设一个电话线路占用 4kHz 的带宽，则一对光纤可以传送 10 亿路电话。实际使用中带宽受到很多因素（脉冲展宽导致的光信号失真等）的限制而不能充分利用，但是其容量还是大大超过电缆，足以满足绝大多数的通信传输需求。例如，典型金属电缆有 900 线对，直径为 70mm，每线对传输 24 个语音信道，该电缆可以承载 21 600 路电话；而用于语音通信的光缆有 144 根光纤，直径仅为 12.7mm，每根光纤能传输 672 个语音信道，该光缆的容量为 96 768 路电话，约为电缆的 4.5 倍。如果再采用波分复用技术使光纤通信系统以更高速率运行（达到 2.5Gbps 或 10Gbps），则差别会更大。

各种通信系统容量的比较见表 1-1。

表 1-1 各种通信系统容量的比较

通信系统	传输话路数（估计值）
平衡电缆	3 000
微波通信	50 000
同轴电缆	100 000
毫米波通信	300 000
光缆（100 芯，4 波分复用）	2 000 000

2. 中继距离长

传输线的损耗会使传输的信号不断衰减，信号传输的距离越长，衰减就越严重，当信号完全淹没在噪声中时，通信就中断了。为了满足长距离通信的需求，需要在传输线路上设置中继器，将衰减了的信号增强后再传输。中继距离越短，需要的中继器就越多，通信系统的成本就越高，维护也越困难，所以减少线路衰减、延长中继距离一直是人们追求的目标。目

前，同轴电缆系统最大中继距离为 6km，微波中继距离也只有 50km 左右。而光纤的损耗很低，工作波长为 820nm 时，商用玻璃光纤衰减的典型值为 4dB/km；在 1310nm 和 1550nm 时，石英光纤的损耗现在已经可以降至零点几 dB/km，相应的最大中继距离约为 160km。尤其是在高频通信应用方面，光纤通信中继距离长的优势更明显，因为同轴电缆的传输损耗会随着频率的提高快速增加，如图 1-1 所示。

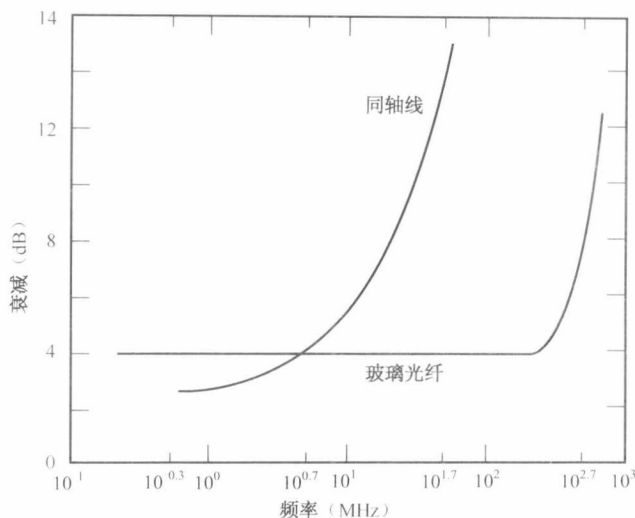


图 1-1 1km 长的同轴电缆和光纤的等效衰减

如果采用非石英系极低损耗光纤，其损耗理论值为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ dB/km，则相应的中继距离可达数千甚至数万千米，这样通信线路都可以不设中继器了。

3. 抗干扰

现代社会对电通信的干扰源比比皆是，有天然的干扰源（如雷电、太阳的黑子活动等），有工业干扰源（如电动机和高压电线），还有广播、电视台、无线通信的射频干扰源等。如果没有防护，这些干扰信号会导致通信系统噪声电平升高甚至超过阈值，而且这些干扰源对电通信造成的影响很难彻底消除。而光纤是绝缘体，无论是自身发送的光信号还是外部电磁辐射都不会在光纤中产生电流，所以光纤有很好的抗射频干扰和抗电磁干扰的能力。另外，光纤传输的光信号限制在芯内，在传播过程中不会泄漏出去，即使在光纤弯曲处，泄漏出的光也十分微弱，如果在光纤或光缆表面涂上一层消光剂，光纤中的光信号就完全跑不出去了，也就不会干扰其他光纤中的信号，相反也不能从光纤外侧将光信号耦合进光纤中，所以允许将多根光纤组成一根光缆，实现多信道传输而不发生串扰。

总而言之，光纤能很好地防护外来的干扰和耦合，无论是电形式的还是光形式的。

4. 保密性好

无线电通信很容易被窃听，随着技术的进步，窃听有线通信也并非难事，只要在明线或者光缆附近放一个特别的接收装置，就可以窃听到传输的信息。因此，现有的电子通信要想提高保密性只能在信源加密上做文章。

而光纤不会向周围辐射光信号，所以窃听者很难检测到光纤中传输的信号。要想截获光纤中的信号，必须与光纤发生物理接触，例如接入一根新的光纤来分流部分光信号，或者将光纤折断来截获光信号，而这样做会使接收机接收到的光信号明显减少甚至消失，接收机可以发现这个变化并发出报警信息提示人们有入侵发生。

5. 节约资源

有线通信采用的电线是由铜或铝等金属材料制成的，而这些金属矿藏的储量是有限的。但是光纤的主要材料是石英（二氧化硅），这种资源可以说取之不尽、用之不竭；而且光纤的纤芯极细，40g 高纯度石英就能拉制 1km 长的光纤，而制造 1km 长的八管同轴电缆则需要耗铜 120kg 和铅 500kg。光纤通信技术的推广应用将节约大量的金属材料，具有节约地球资源的战略意义。

光纤通信的上述优点使其除了在公用通信和专业通信中得到广泛使用以外，还在其他许多领域得到了广泛应用，如测量、传感、自动控制和医疗卫生领域。

1.2 光纤通信系统的基本组成

光纤通信系统由光发射机、光接收机、光纤和各种耦合器件组成，如图 1-2 所示。输入信号是电信号，经光发射机，将电信号变换成光信号，再由定向耦合器把光信号耦合入光纤进行传输，传输过程中可能加入光放大器或光中继器进行信号中继；在接收端，由耦合器把光信号耦合入光接收机，将光信号恢复成电信号。理想情况下，输出的电信号应与输入的电信号完全一致。

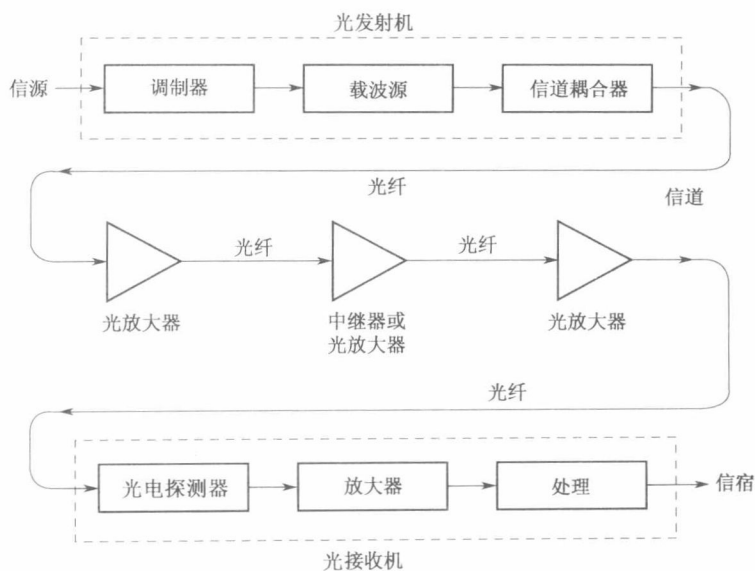


图 1-2 光纤通信系统组成框图^[1]