

光纤通信基础

雷肇棣 编著



电子科技大学出版社

73-2614
710

光纤通信基础

雷肇棣 编著



电子科技大学出版社

9810009

423-780
535
235

光纤通信基础

雷肇棣 编著

*

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号) 邮编 610054

成都印刷一厂印刷

新华书店经销

*

开本 850×1168 1/32 印张 7.25 字数 182 千字

版次 1997 年 6 月第一版 印次 1997 年 6 月第一次印刷

印数 1—3000 册

ISBN 7—81043—524—8/TN·55

定价: 9.00 元

内 容 简 介

本书首先简要介绍了光纤通信的原理、特点、系统组成和发展历史，然后较深入详细地描述了光纤通信系统中的关键元器件和光纤、光源、探测器等的工作原理、性能指标及其物理含义、较系统地介绍了和光通信有关的调制复用等概念。对相干光通信及光纤放大器等光通信中发展的前沿课题也作了简要的介绍。

本书可作为大专院校通信、光学、激光技术、光纤传感专业学生的教材，也可作为有关科技人员的培训教材及参考书。

2015/10

序

激光是 20 世纪最伟大的科学技术发明之一。自 1960 年第一台激光器诞生后，光通信就是科学家们梦想的激光最重要的应用领域。由于通过光纤传输可以克服大气的不良影响，光纤通信终于使科学家们的梦想变成现实，光纤通信是激光技术投入实际使用、造福人类的最广泛、最重要、最成功的领域之一。光纤通信已经成为一门新兴的高技术支柱产业，它带动了整个光电子技术的发展，它和计算机一起将人类带进高速发展的信息化时代。

我国光纤通信正进入蓬勃发展时期，许多人都急切希望了解有关光纤通信的知识，本书就是为此而编写的。为了让更多的读者能读懂其中的内容，因此尽量避免一些繁杂抽象的数学推导，而重点放在有关基本概念、基础知识的介绍上。

本书共分七章：第一章介绍光通信的基本概念、发展历史和展望；第二章介绍光纤和光缆；第三章介绍光源；第四章介绍探测器；第五章介绍调制和复用方式；第六章介绍相干光通信；第七章介绍光纤放大器。每章基本上是

独立的，因此，读者不必从头读到尾，而可根据自己的情况选择感兴趣的部分阅读。本书大部分内容曾在“光通信技术”杂志上发表，作者并以此为基础曾在电子科技大学和有关科研单位讲授“光纤通信”课程。受各方鼓励，现将其整理出版。由于作者学识水平所限，疏漏错误在所难免，恳请批评指正，不胜感激。并想借此机会向作者曾工作过的中国科学院上海光学精密机械研究所、电子部桂林光通信研究所、电子科技大学以及西南技术物理研究所的专家和同仁们表示感谢，他们在学术上曾给予我极大的帮助，没有他们的支持鼓励，是不会有本书的出版的。

雷肇棣

1997年4月于成都

目 录

第一章 绪论	1
第一节 光通信的概念及系统的基本组成	1
第二节 光通信系统的分类	4
第三节 光纤通信的特点	6
第四节 光纤通信的发展历史和展望	10
第二章 光纤和光缆	19
第一节 光纤和光缆的结构与分类	19
第二节 光纤的折射率分布	23
第三节 光纤的数值孔径 NA	25
第四节 光纤中模的概念	32
第五节 光纤的损耗	36
第六节 光纤的色散	42
第三章 光源	56
第一节 光纤通信对光源的要求及光源的种类	56
第二节 半导体器件的发光原理	58
第三节 异质结结构	66
第四节 光源的工程参数	74
第五节 半导体发光二极管 LED	90
第六节 半导体激光器 LD	97
第七节 超发光二极管、长波长半导体光源和固体光源	101

第四章 光探测器	107
第一节 探测器的分类和光通信对探测器的要求	107
第二节 探测器的有关术语和参数	111
第三节 光电探测过程	116
第四节 光电二极管	121
第五节 雪崩光电二极管 APD	125
第六节 光电探测器的噪声	133
第七节 长波长光电探测器	145
第五章 调制和复用方式	159
第一节 模拟调制方式	160
第二节 数字调制方式	171
第三节 复用方式	188
第六章 相干光通信	196
第一节 相干光通信的概念	196
第二节 相干光通信的基本原理	197
第三节 相干探测的信噪比	199
第四节 相干光通信的优点	200
第五节 实现相干光通信的几个技术问题	202
第七章 光纤放大器	208
第一节 光纤放大器的工作原理	208
第二节 光纤放大器的构成及泵浦方式	212
第三节 光纤放大器的噪声和性能指标	215
第四节 光纤放大器的应用	219
参考文献	225

第一章 绪 论

第一节 光通信的概念及系统的基本组成

所谓通信，就是互通信息，互相传递信息。信息的含义很广，声音是信息，图像是信息，数据也是信息。因此，通信不仅是打电话，传电视、传数据也是通信。通信的基本目的是将信息尽可能不失真地从一个用户传递给另一个用户，或者反过来进行传送。而光通信，顾名思义，就是利用光波来进行通信。光通信是相对于电通信而言的。以往的电通信，包括有线电通信和无线电通信，是利用电磁波来进行通信的。当然，光波也是一种电磁波，只不过它的频率更高，波长更短。图 1-1 是电磁波频谱图。由图中可以看出，光波只占整个电磁波频谱中的一部分。我们现在所说的光通信中的光波，不是狭义上的只为肉眼所能看见的可见光，而是广义上的包括红外线在内的整个部分。整个电通信的发展过程，是从长波到短波，从低频到高频，即从低频无线电波 (Radio Frequency) 到高频微波 (Micro Wave) 的发展过程。从图 1-1 可以

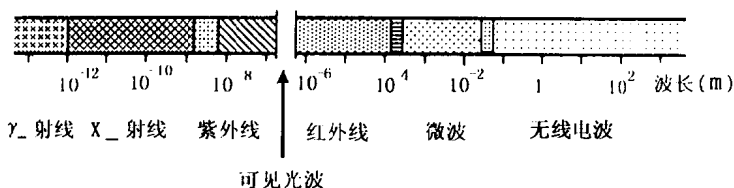


图 1-1 电磁波频谱图

看出,光波,包括红外线,它们的波长比微波更短,频率比微波更高,因此,从电通信中的微波通信向光通信方向发展,是一种自然的,也是必然的趋势。

光通信是利用光波来进行通信,光通信系统的基本组成结构框图如图 1-2 所示:在 A 端将各个从用户来的信息,包括电报、电

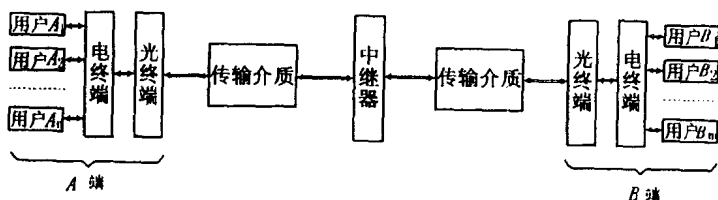


图 1-2 光通信系统的基本组成结构框图

话、传真、图表文字、图像、电视、可视电话、数据等各种信息,以电信号的形式送到电终端,电终端将所有这些电信号信息组合起来变成复合电信号。这种组合过程又称为复用或复接 (Multiplexing)。然后,这种复合电信号再送到光终端中去调制光终端中的光源或发光器件,使这些电信号变成光信号,以光信号的形式进入传输介质进行传送。传输介质,可以是大气或真空,也可以是光纤或光波导。由于光信号经过一定距离传输后不可避免地会受到各种衰减,光信号将变得越来越弱;同时,由于传输路径上的各种干扰,还会引起信号失真。需要中继器对被衰减并产生失真的光信号进行放大、整形,然后再进行传输。中继器就像加油站一样,使接力赛跑的接力棒一次又一次地往下传。中继方式有光——电——光方式和光——光方式两种。在光——电——光方式中,首先需要将光信号变成电信号,然后对电信号进行放大整形,最后再用放大整形后的电信号去驱动光源而得到新的幅度较强波形较好的光信号,再进行下一级传送。光——光方式是直接将光信

号进行光放大，而无须先将光信号转换成电信号。近年来迅速发展起来的掺铒光纤放大器，就可以用于光——光中继方式。当光信号传送到B端以后，首先进入B端的光终端，在光终端中将光信号解调出来变成电信号，经过放大整形后再送到电终端进行解复用（DeMultiplexing），同时还将对信号进行交换，使其正确无误地到达指定的用户；反过来，信息由B端传送到A端，是完全类似的相反的过程。当然，实际的光通信系统比这复杂得多，但基本组成是没有多大变化的。

从光通信系统的基本组成可以看出，虽然光波是属于整个电磁波频谱中的一部分，但光通信毕竟和一般的电通信不同，其主要差别在于光终端和传输介质，即在光终端中使用的光源，光电探测器和其它一些光学元件，而传输介质使用的是由光纤构成的光缆，不是一般的电缆等。

由于光通信和一般的电通信主要差别在于光终端和传输介质，即在光终端中使用的光源，光电探测器和其它一些光学元件以及光纤等，因此，下面用图1-3来进一步说明光信号的处理和传

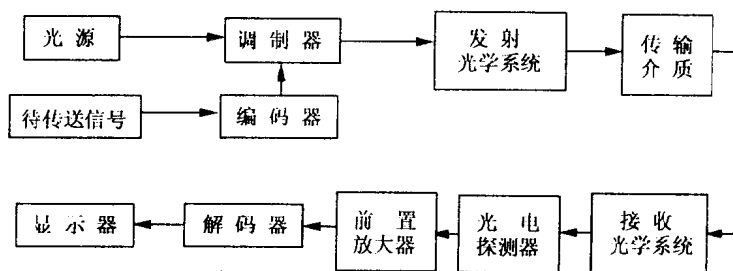


图 1-3 光信号的处理和传递过程

递过程：待传送的信号经过编码器编码后加到调制器上去调制光源发出的光，被调制后的光由发射光学系统发送出去。因为光波

也是一种电磁波，发射光学系统所起的作用和无线电发射天线所起的作用完全相同，因此，发射光学系统又称发射天线。由发射天线发送出去的光信号经过传输介质，如大气、光纤等，到达接收端。在接收端，由接收光学系统或接收天线将光聚焦到光电探测器上，光电探测器的作用是将光信号转变成电信号。由于光信号经过长距离传输后会衰减和失真，因此需先用前置放大器将其放大整形，然后送解码器进行解码，最后由终端显示器，如电话、传真机、电视等将原始信号显示出来。

第二节 光通信系统的分类

光通信系统可以按不同的方式来进行分类。

若按传输介质来进行分类，可分为大气光通信系统和光纤通信系统。大气光通信系统是属于无线通信系统，它的传输介质是大气或真空。由于地球表面大气层对光衰减很严重，因此地面大气光通信的发展受到限制。但是，今后卫星之间的光通信，即空间或深空光通信系统，仍然是非常有前途的。因为在宇宙空间中，传输介质几乎是真空，没有大气干扰和衰减的问题。光纤通信系统是属于有线通信系统，它的传输介质是光纤，这是本书将重点介绍的内容。

若按调制方式来进行分类，可分为模拟光通信系统和数字光通信系统。模拟光通信系统传送的是模拟信号，数字光通信系统传送的是数字信号。所谓模拟信号，是指在幅度上和时间上都是连续变化的信号；所谓数字信号，是指在幅度上和时间上都是不连续变化的、离散的信号。对于一般的脉冲信号，虽然它在时间上是间断的、不连续的，但它在幅度或宽度上仍是连续变化的，我们一般也认为它们是模拟信号而不是数字信号。因此，不能将脉冲调制方式一律看作是数字调制方式，不能将两者简单的等同起

来。但是，数字调制方式必然是脉冲调制的。模拟调制方式有许多类型，如强度调制（IM——Intensity Modulation），幅度调制（AM——Amplitude Modulation），频率调制（FM——Frequency Modulation），相位调制（PM——Phase Modulation），脉位调制（PPM——Pulse Position Modulation），脉宽调制（PWM——Pulse Width Modulation 或 PDM——Pulse Duration Modulation），脉幅调制（PAM——Pulse Amplitude Modulation），脉冲频率调制或脉冲数调制（PFM——Pulse Frequency Modulation 或 PNM——Pulse Number Modulation）等等。数字调制方式主要有脉冲编码调制（PCM——Pulse Code Modulation），差分脉冲编码调制（DPCM——Differential Pulse Code Modulation），增量调制（ ΔM ）等。由于数字通信系统所占的带宽比较宽，而带宽非常宽又是光纤的主要优点之一，因此，光纤通信系统特别适合于采用数字调制方式的数字通信系统，光纤通信的发展极大地促进和推动了数字通信的发展。虽然光纤通信和数字通信两者是密切相关的，但光纤通信和数字通信毕竟是两个不同的概念，两个不同的范畴，不能将两者等同起来，混为一谈。

若按信号的复用方式来进行分类，可分为频分复用系统（FDM——Frequency Division Multiplexing），时分复用系统（TDM——Time division Multiplexing），波分复用系统（WDM——Wavelength Division Multiplexing）和空分复用系统（SDM——Space Division Multiplexing）。所谓频分、时分、波分和空分复用，是指按频率、时间、波长和空间来进行分割的光通信系统。应当说，频率和波长是紧密相关的，频分也即是波分，但在光纤通信系统中，由于波分复用系统分离波长是采用光学分光元件，它不同于电通信中一般采用的滤波器，所以许多人仍将两者分成两个不同的系统。

若按光电探测方式来进行分类，可分为直接探测光通信系统

和相干探测光通信系统。直接探测是将光作为粒子，即光子来处理的，而相干探测则是将光作为波，即光波来处理的。

若按传输距离的长短来进行分类，可分为长距离干线光纤通信系统、中短距离局间光纤通信系统和短距离用户光纤通信系统。长距离干线光纤通信系统一般是几百公里、上千公里、甚至几千公里陆地或跨洋海底光纤通信系统。局间光纤通信系统一般只有几公里或几十公里。随着光纤光缆成本的下降，光缆甚至可以直接到用户，这种超短距离使用的用户光纤通信系统一般只有几十米到几百米，同时，这种超短距离使用的光纤通信系统在光纤传感通信方面，也是有相当广阔的应用前景的。

第三节 光纤通信的特点

光通信和普通的电通信相比，有许多独特的优点：

第一，光通信使用光载波的信息容量特别大。

我们曾经指出，光波和一般电磁波相比，它的频率更高，波长更短。例如，对于波长 λ 为 $6000\text{\AA}$ ，即 $0.6\mu\text{m}$ 的红光，其频率高达 $5 \times 10^{14}\text{Hz}$ ，因为频率 f 为

$$\begin{aligned} f &= c/\lambda \\ &= 3 \times 10^8 / 0.6 \times 10^{-6} \\ &\doteq 5 \times 10^{14} \end{aligned} \quad (1-1)$$

其中 c 为真空中的光速。而一般电磁波的频率为 $3 \times 10^5\text{Hz} \sim 3 \times 10^8\text{Hz}$ ，即使电磁波中波长更短的微波，其频率也仅为 10^{10}Hz 。我们知道，在载波通信中，如果载波的频率越高，则它的信息容量就越大。或者简单地说，它容许通话的路数就越多。如果用光波作载波，由于光波的频率很高，所以它的信息容量就非常巨大。我们可以这样简单来估算一下光通信中光载波的信息容量：一个标准电话路所占的频带宽度为 4kHz ，即带宽 Δf 为 $4 \times 10^3\text{Hz}$ ，而光

载波的频率为 $5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。因此，从理论上讲，对于频分复用 (FDM) 光通信系统，它能容许的最多的通信话路的路数 N 为

$$\begin{aligned} N &= f / \Delta f \\ &= 5 \times 10^{14} / 4 \times 10^3 \\ &= 1.25 \times 10^{11} \end{aligned} \quad (1-2)$$

即可以通 1250 亿路电话。若用它来传电视，因一路电视的带宽 Δf 为 $6 \times 10^6 \text{ Hz}$ ，即 6 MHz ，通过同样简单的计算可以知道，它可以传送 10^8 路，即 1 亿路电视。这几乎是令人难以置信的神仙数字。这是激光刚一问世就令科学家们欢欣鼓舞的重要原因之一。但这只是理想的情形，事实上由于许多技术上的困难，是不可能达到这样高的信息容量的。不过，无论如何，信息容量大，的确是光通信的一个非常突出的优点。

第二，光纤通信中，光纤的带宽宽，传输数据速率高。

光通信系统中，除了要求使用的光载波的信息容量大而外，还需传输介质的频带宽度也要宽，否则信息容量就会受到信道传输介质的频带宽度的限制。在光纤通信中，传输介质是光纤。光纤的特点之一就是它的带宽非常宽，可达几千兆赫兹乃至更高，比一般的通信电缆的频带宽度要宽得多。所谓信道传输介质的频带宽度，可以通俗形象地将它比作公路的路面宽度。公路的路面宽，自然允许通过的车流量就大。正因为如此，现在有人将光纤通信系统比喻为信息高速公路，在这种信息高速公路上，不仅允许通过的“车”流量，即信息容量大，而且允许许多占“公路”的路面很宽的“大车”，即占频带宽度很宽的信号通过。比如在前面所举的例子中，一个标准电话话路所占的频带宽度为 4 kHz ，即带宽 Δf 为 $4 \times 10^3 \text{ Hz}$ ，它只相当于一辆自行车所占的公路的路面宽度，而一路电视的带宽 Δf 为 $6 \times 10^6 \text{ Hz}$ ，即 6 MHz ，它将占用 1500 路 ($6 \times 10^6 \text{ Hz} / 4 \times 10^3 \text{ Hz}$) 电话话路所占的频带宽度。简直像是一辆特大特大的卡车，它所占路面宽度，相当于 1500 辆自行车所占路面

宽度。尽管如此，由于光纤的带宽非常宽，即使对这样占频带很宽的信号，它也是不在乎的。另外，正是由于光纤的带宽非常宽，所以它还特别适合于进行数字通信。数字通信具有中继过程中噪声不累加，噪声可以压制到任意小等优点，是一种先进的通信方式。但是，数字通信所占传输信道的带宽较宽，也就是说，它的优点是以牺牲信道带宽为代价的。由于光纤带宽很宽，因此，它完全能够承受这种牺牲。在数字通信中，是以每秒能传输的比特数，即 0 或 1 的个数，来表示它的信息流量或信息容量的。很明显，每秒能传输的比特 (Bit) 数越高，0 或 1 所占的时间间隔就越小，或者简单地说，它要求信号脉冲越窄。而信号脉冲越窄，它所占的信道的带宽就越宽。由于光纤的带宽非常宽，所以它允许将光脉冲信号压缩得很窄。在光纤数字通信中，它允许每秒传送的比特数非常高，可达上千兆比特。换句话说，光纤传送的数据速率（每秒比特数）很高。需要说明的是，光纤传送的数据速率高和光的传播速度快是两个概念。光的传播速度和电磁波的传播速度是一样的，不存在所谓快和慢的问题，在介质中它们的速度都为 c/n ，其中 n 为介质的折射率。有人把传送速度快看作是光纤通信的优点，这实际上是一种误解。光纤的折射率 n 一般约为 1.5，即传播速度约每微秒 200m，这几乎是恒定的值。而光纤的数据传送速率则是以每秒能传输的比特数来表示的。

第三，光纤损耗低，中继距离长。

由于传输介质对光的吸收和散射，光纤总有一定的损耗存在，使光信号通过光纤后变得越来越弱。由于技术和制作工艺的进步，目前已使光纤损耗降至很低，每公里仅零点几乃至零点零几分贝 (dB)。因此，光纤通信系统的中继距离可以非常长，一般几十公里乃至上百公里才需中继放大一次。这是电缆根本无法与之相比的。一般电缆的损耗是以百米为单位来计算的，每百米几分贝甚至十几分贝。在电缆通信系统中，中继距离仅一两公里。所以光

纤通信特别适合于长距离干线通信，包括跨洋海底通信。由于目前光纤的损耗降得越来越低，以至于光纤的损耗已不再是阻碍中继距离加长的主要和关键因素，因此，许多中继距离受光纤损耗限制的光纤通信系统，现已变成受光纤带宽限制的光纤通信系统了。因为受光纤带宽限制，光脉冲会变宽。当传送数据速率高时，脉冲之间间隔很小，若在传输过程中因为受光纤带宽的限制而使脉冲宽度变宽，会导致前后脉冲无法分辨。在这种情况下，即使光纤损耗再低，到达终点的脉冲幅度再大，也是无法分辨的。这就是受光纤带宽所限制的光纤通信系统。因此，为了增大中继距离，降低光纤损耗和扩展光纤带宽，两者是缺一不可的。

第四，光纤通信的保密性好，不易被窃听。

由于在传输过程中光纤是将光信号束缚在光纤芯内传播的，光信号向外辐射、泄漏极小，光纤之间串音很小，在传输途中很难被窃听，所以光纤通信保密性很好。这在国防、军事、经济上都有重要意义。

第五，光纤通信的抗电磁干扰能力强。

一般的电磁辐射的频谱，和光波的频谱相距甚远，它不会叠加到光信号上或混入光信号中，也很难进入光纤芯内影响光信号的传送，而光电探测器又只对一定波段上的光频信号才响应，对一般的电磁波不响应，因此，光纤通信抗电磁干扰能力很强。这使光纤通信系统特别适合于在有强烈电磁干扰的地区或场合中使用，诸如电力系统、电气化铁道中的通信系统、计算机系统中使用。这一优点是一般电缆通信无法比拟的。

第六，光纤通信系统的绝缘性能好。

由于光纤是由不导电的二氧化硅等材料制成，因此，它的绝缘性能好。这使得光纤通信系统特别适合于在强电系统中使用。

第七，在光纤通信系统中，不存在接地和共地的问题。

接地和共地的问题，在通信和电子仪器设备中，是重要