

前 言

本文献汇编是国家科委下达的研究课题《光纤通信公用网系统发展技术政策的意见》中资料汇编的一部分。文中收集了50篇近年来国外发表的光纤通信方面的代表作及展望和报道。

光纤通信国外文献汇编共分四方面：光纤通信系统；光纤光缆；光电器件；新技术。除个别文献是1981年发表的以外，均是从1983、1984年国际会议论文集和杂志中精选的论文。文末还附有“光纤通信技术术语”英汉对照一览表。现将编选原则和主要内容按类别说明如下：

一、光纤通信系统部分（共13篇）

这一部分共收集文章13篇，其中第1、2篇为被誉为光纤技术之父的高锟博士的谈话和论述。在第一篇中高博士认为使用目前半导体激光器作光源，光纤通信的传输码速可能达到10Gb/s（相当于15万路电话）。在第二篇文章中，高博士对相干技术、集成光学和材料加工的前景作了扼要的论述和展望。

在系统的实用化应用方面，选择了三篇文章，鉴于光纤通信在长途干线上应用时涉及到的技术问题比较复杂，故选择了国际电联的电信杂志1981年光纤专刊上的一篇关于光纤在干线网中的应用的文章，另外选了一篇关于海底光缆系统的遥测遥控对话信道的论述，该文全面地评述了遥测遥控对话信道的方法，对陆地长途干线也有参考价值。其次，为便于全面了解国外实用化系统建设情况，选了一篇关于各国长距离通信的综合报道。

由于国际上正积极进行长距离和高速率通信的研究和实验（这是光纤通信近期的发展方向），故选了这方面的论文和报道共8篇。这些处于试验阶段的技术是采用不同的光电器件进行的，如采用DFB激光器进行420Mb/s系统203公里无中继的试验，采用超腔DGPBH-InGaAsP激光器的4Gb/s直接调制的试验，以及采用LED与单模光纤配合可实验稳定性好的大容量数字传输等，这些文献可作为今后我国发展光纤通信的参考。

二、光纤光缆部分（共16篇）

石英光纤被看作本世纪最大革新（光纤通信的支柱）。我们选的第一篇是日本一作者对石英光纤的总的评述；该文对石英光纤遗留的问题作了分析，其中有些观点可供参考。

自1983年起单模光纤通信系统进入了实用化阶段，目前国际上以单模光纤的研制为重点，本文集选了单模光纤近年来发表的文章共8篇（第2~9篇）。单模光纤可分为两大类：第一类为零色散在1.3 μ m波长处的光纤（主要是阶跃型的），这是目前技术比较成熟并已大量生产的单模光纤；第二类是零色散向大于1.3 μ m波长移动的光纤，这类光纤的结构有双包层（W型）、三包层、四包层和三角形折射率分布型等，其中有的是在1.3~1.55 μ m波段具有宽频谱的低色散，有的是在1.55 μ m波长处具有低色散和低损耗。在本文集对这些类型的光纤，都随相应的最新发表的论述著作，使我们能方便地了解其传输特性。这些文献可能

有的涉及到较深的传输理论,但从结论中可看出其特点。

在多模光纤方面,由于技术已很成熟,故仅选了两篇论文(第10~11篇),其中,一篇是关于渐变型光纤参数设计,另一篇论述了带隙链接指数与波长的关系。

在光纤涂敷材料方面,由于有关松结构光缆用的光纤涂敷文献少,仅选了两篇关于紧结构光缆用光纤的两种新涂料的论述。

除石英光纤已大量应用外,在短距离内用的塑料光纤的研究目前也已活跃起来。故分别选了一篇关于塑料光纤的综述和一篇论述其最新发展的文章。

三、半导体光电器件部分(8篇)

在光源方面,共选了三篇论文。其中第一篇是综合论述半导体激光二极管的发展过程及今后应努力的方向。

目前,工作在 $1.3\mu\text{m}$ 激光器的实用化应用中,存在着如何获得高效率、高功率的单模激光器和如何使激光器具有长寿命,故对这两个问题各选了一篇论述(第2—3篇)。

由于光纤通信正向长距离和高速率方向进军,如何在 $1.55\mu\text{m}$ 波长高速调制下获得动态单纵模激光器,此一问题是目前的重要课程之一,本文集选了两篇这方面的论述。

在光电检测器方面,共选了三篇有关长波长检测器的文献。第一篇为综述四元素PIN管和Ge及四元素APD的文献(第6篇),另两篇为有关新型检测器的论述。

四、新技术部分(共13篇)

新技术包括相干通信、波分复用,孤子、集成光学、光纤的非线性光学、红外光纤等。

关于相干通信,目前日、英、美等国都在积极进行试验,我们选了三篇这方面的论文,其中第一篇为各种相干通信系统误码率的计算,并得出了相干系统可提高接收机灵敏度10—20dB的结论。另一篇是关于光移相键控外差单滤波器检测的实验,这种方式可容许比较宽的激光二极管谱宽。实现了100Mb/s的100公里的传输。第三篇为相干检测在光纤电视分配网应用方面的论述,并通过实验证实了相干检测可提高接收机灵敏度8—11dB。

在波分复用方面,共选了三篇文章,其中有两篇是干线单模光纤系统采用四倍道的波分复用,每信道容量为140Mb/s或560Mb/s,采用的复用器为光栅式或干涉滤波片。另一篇(第6篇)为用户网的波分复用,这是为用户用一对光纤能实现多种业务通信而采取的波分复用,目前以日本应用较多,故选了一篇日本的文献。

光孤子是光纤通信新技术中的最新课题,它可提高通信容量和延长通信距离。因此,选了一篇有关孤子激光器的论述,介绍其基本概念。

集成光电子学是六十年代末期即已提出来的课题,但进展比较缓慢。近年来,由于在光纤和半导体激光器发展的促进下,人们对集成光学又一次引起了关注。因此选了两篇有关这方面的论述,指出了发展前景及存在的问题。

在光纤非线性光学方面,选了一篇对光纤非线性光学的探讨的论述。另外,选了一篇论述纤维的非线性对系统设计的影响的文章,指出相干传输系统采用移相键控可消除布里渊散射。

在红外光纤方面选了两篇论文。这类光纤在 $2.12\mu\text{m}$ 波长的最低损耗已达8.5dB/km。

目 录

一、系统

10Gb/s达到了极限

——与光纤技术的先驱高锟博士的座谈.....	(1)
高速发展的纤维光学.....	(2)
光纤在干线网络中的应用.....	(4)
光纤海底数字电话链路水底设备的遥测和遥控的对话信道.....	(16)
采用石英芯光纤和DFB激光器进行420Mb/s 203公里的传输.....	(21)
采用单块集成电路的565Mb/s单模传输系统.....	(23)
采用1.3 μ m波长高速率面发光型DH LED的Gb/s光纤传输实验.....	(26)
采用PIN—FET接收机的1.1~1.6 μ m波长的Gb/s光纤通信系统.....	(29)
采用石英芯光纤和气相迁移DFB激光器进行2Gb/s 130公里传输实验.....	(32)
各国的长距离光纤通信系统.....	(34)
采用1.3 μ m发光二极管和单模光纤的视频传输.....	(37)
实验性1.2Gb/s光调制解调器及其在多信道数字视频传输中的应用.....	(41)
1.3 μ m和1.5 μ m短腔DCPBH InGaAsP激光器的4Gb/s直接调制.....	(45)

二、光纤光缆

通信用石英玻璃光纤的遗留课题.....	(49)
1.3和1.5 μ m单模光纤的最佳设计.....	(52)
宽带单模光纤.....	(53)
单模光纤的设计.....	(56)
仅掺氟的宽带石英单模光纤的色散特性.....	(57)
在宽频谱范围内低色散的渐变芯W型单模光纤.....	(60)
只掺F与只掺GeO ₂ 的石英单模光纤色散特性的比较.....	(64)
1.55 μ m色散为零的渐变型、阶跃型单模光纤基模光斑尺寸和弯曲灵敏度.....	(67)
单模光纤有效截止波长与长度的关系.....	(73)
长波长多模渐变型纤维参数的设计.....	(78)
多模光纤中带宽链接指数与波长的关系.....	(85)
缓冲作用良好的高强度双涂层长光纤.....	(87)
硅树脂涂料中的Si—H对光纤红外损耗的影响.....	(90)
塑料光纤.....	(93)

低损耗塑料光纤	(100)
光缆	(102)

第 四 章

三、器件

目录

通信用半导体光器件的展望	(113)
高效率大功率单模半导体激光器	(114)
在高温和大电流条件下筛选长波长激光器	(117)
用于长波长范围和集成光学的动态单模半导体激光器的新进展	(119)
光耦合半导体激光器的特性	(122)
长波长检测器	(125)
以反偏置掺杂超晶格为基础的新型长波长光电探测器	(128)
采用气相外延生长的低噪声高速度平面结构InP/InGaAs光电二极管	(130)

四、新技术

各种外差和相干式光通信系统的误码率计算	(133)
采用直接调制分布反馈激光二极管的光移频键控外差单频波通信系统	(143)
光纤电视分配网中的相干检波	(147)
单模光纤四信道波分复用系统	(150)
用一根单模光纤进行的 $2 \times 565\text{Mb/s}$ 和 $2 \times 140\text{Mb/s}$ 信道WDM传输实验	(153)
光纤用户系统的多路传输——光合波·分波器的研制	(156)
孤子激光器	(159)
集成光路的进展	(160)
光电集成回路的现状及未来	(164)
光纤非线性光学：问题、局限性和利用的可能性	(167)
纤维中的非线性——系统设计中的一个新问题	(168)
评红外光纤的新材料	(171)
氟化物光纤的制作	(173)

五、光纤通信技术术语英汉对照一览表

.....	(183)
-------	-------

10 Gb/s 送到户板根

——与光纤技术的先驱高锟博士的座谈

人们常称其为光纤技术精神之父的C.高锟博士出席了9月份在斯图嘉特举行的第10届欧洲光通信会议(EOC'84)。C.高锟博士很早就看到了利用玻璃纤维传输光信号的可能性,并于1963年就在他发表的一篇文章中论述了其物理和技术的条件。那时他是STL(标准电信实验室)的工作人员。1970—1974年期间,他作为电子学教授在香港中国大学任教。他以从事基础研究而忠实地坚持在光通信技术领域中,仅是25个有关的专利证书就足以证明这一点。由于他的指导方向性的工作,得到了国际上给予他的许多荣誉。其中最重要的也许是1982年授予他“ITT有执行权的科学家”称号,因此他有权在自己选择的实验室里不受合同约束地工作5年,这当然是某些科学家梦寐以求的。

在欧洲光通信会议上,SEL(罗伦兹标准电器公司)组织安排了一次高锟与专业记者的谈话。参加座谈的还有SEL研究中心经理Dr.H.Ohnsorg,84届欧洲光通信会议主席Dr.H.Haupt和R.Th.Kersten。由于光通信技术已超出实验阶段,在世界范围内正在应用之中。仅在美国,迄今为止就已经安装了650,000公里光纤,记者向高锟博士提问:继续发展的目标重点在哪里?他认为重点之一是提高传输速率(的方法)。目前能提供使用的系统可达1 Gb/s,不久可达4.2 Gb/s,限于二极管激光器的调制特性,作为首先是在实验室里可能接近的上限大约为10 Gb/s^{*}。鉴于其特大带宽,预计将比使用多个系统波分复用经济得多。作为解决办法,例如利用电子和光之间的交变效应,理论上最高速率甚至可望达到和超过1000 Gb/s。这一速率能通过一根光纤传几乎是任意多路高分辨率的、相当于照片质量的电视节目,在必要时这些节目可以是三维(立体)再现。另一方面,可能以同一根纤维连接许多用户,从而,纤维费用在网络地区范围内将明显减少。

另一个问题是从当前常用的光强度调制改变成光波长调制,当然这要以极稳定的单频激光器及探测器为前提,这样才能检出极小的波长变化幅度。光系统,特别是极宽频带系统,到底有多快能采用,确实取决于元器件。首先是终端的费用。其中,微电子的高度集成起决定性作用。在同一块基片上电子器件和光器件的结合可能使价格骤降。至于光纤的衰减已趋近物理极限,因为目前可提供使用的光纤所能跨越的距离,对几乎所有的要求都能满足。所以用合成材料制造较短波长时可能显示出更低衰减的纤维,是否值得,看来还有争论。与此相反,生产光纤的过程却有更大发展的可能性。因此,SEL研究了一种用粉末预制棒生产光纤的方法。

根据消息灵通人士报道,C.高锟博士下一步将在斯图嘉特的SEL研究中心继续进行他的工作。

高速发展的纤维光学

高 键

[摘要]由于采用了相干技术,再过十年或略早于这个时间,就可将光纤的通信距离与带宽的乘积显著提高40倍,从而将加速集成光电路的推广应用。

引言

在今后的五至十年里,低损耗的单模光纤波导将在100公里或更远的无中继距离上,以高于6 Gb/s的传输速率传输数字多路视频带宽信号,即等于目前的光纤通信距离与带宽的乘积的40倍或铜线的通信距离与带宽的乘积的200倍。此性能的改进是由以下三个主要方面的技术进步所造成:相干技术、集成光电子学和材料加工。

相干技术

即使是目前最先进的光传输系统,其光源也要产生非相干的能量辐射。而相干技术将使光源相当于无线电频率源,即它将输出具有高度光谱与时间相干性的光波。

目前,相干技术使信号处理技术应用于光纤系统的无线电载波成为可能,从而提高了信号处理的灵活性和通用性。例如,在兼顾解决发信速度和选定空间的情况下,将可能设计出更有效的信号控制系统。而已知的业务量根据发信速度、载波波长值和光纤数可以用各种各样的方式进行传输。相位信息(例如载波和参照射来的相对相位差)通过干涉测量技术的应用也提高了检测的灵敏度。

对于信号输出端,光信号的相干性会产生一些副作用。其中之一便是模噪声,这个问题已在标称非相干的传输系统中遇到过。此外,相干性增强了非线性效应,从而产生显著的信号退化。这种情况在单模传输系统中尤为明显。在实现长中继间距的大容量系统以前,有必要对这些现象获得透彻的了解。

相干技术在理论上的优点要待采取措施改善器件性能(例如稳定激光器的发射波长、有意采用某种非相干值或限定光源的功率)并控制如非线性这些副作用所引起的噪声和干扰信号(例如模噪声)以后才可实现。

集成光电子学

集成光电子学是光器件和电子器件的结合,它是稳定的、高性能的子系统,它起初是包

括电子电路（用于信号的产生、调制、放大、检波、转换和滤波）和光器件（光源和探测器）声学器件可用作耦合。

图1说明三个阶段的发展过程。第一阶段表示早期还没有集成电路的光纤系统；第二阶段是有若干集成技术的目前技术水平；而第三阶段是全集成结构。这就使得在三元或四元（即包含三或四组份）的半导体的单一材料基底上能建造集成结构，于是只需用单一材料而不是两种或更多种的材料就可满足电子器件和光器件的制作要求。

集成结构将应用分立交换和信号分配技术，即通过开关从一根线耦合到另一根线，这种开关按时间处理单个比特，并消耗一定的功率。另一方面，相干光波传输的比特能应用空间和时间序列的信号分配技术从一根线流至另一根线并可能消耗小一些的功率。

集成电路的主要优点在于减缓电/光和光/电信号转换时呈现的互相联系的问题。此外，稳定的结构是实现在小型的、密集的和用途广泛的结构中能控制相干光波电路的关键。

这项技术将频率上限扩展到能为电子电路而传导；对亚毫秒的脉冲易于控制。

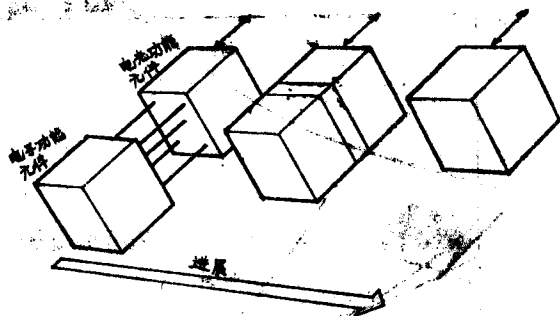


图1 光电传输系统器件集成的发展

材料加工

由于设备和技术（例如次微微秒脉冲探测器、分子束外延和金属有机液相外延）改进的结果，正使电子器件材料加工技术取得快速的提高。于是，电子器件和光电器件在保持必要的增益和低的噪声特性的同时，将能运用于更高的频率。这些器件的工作速率高至10千兆赫约比目前的性能高一个数量级。它将被用于能算处理由于数据处理速率的不断提高所造成不可避免的业务量的不断增长的电信设备中，这个过程使其本身得到补充和增强。

图2和图3示对于光纤、光源、光探测器和波长倍增器所期望的性能参数。在说明解释这些图形时，重要的是要注意到这些性能数值是表示每一个技术部份所能达到的成果；但这绝不意味着这些性能的水平一定会同时得到或在任一特定系统中实现。例如，应用于长距离、无中继的2至10微米激光器可能需要冷却，而 0.01dBkm^{-1} 的纤维损耗只在范围为2至10微米的波长上才能达到。然而，不必把要求冷却看作重大的问题，能达液氮温度的便携式冷却器已可利用。因此，从这些性能和参数的具体化可得出结论，基于这些改进措施的大功率新型传输系统，可获实现是有充分根据的。

光纤及其相关器件的成本下降，为向用户提供宽带的通信服务成为可能。但是，仅仅是成本的减低还不会引起宽带市区网路的普及。而由于需要将家用计算机与其内容包括完全活动的视频信息的中心数据库连接反而会产生促进作用。尽管还难以预见到这种需要的日益迫切性，但是易于看到还有必要继续扩展对其实际意义的了解。因此，毫无疑问，在纤维光学方面的进展将加速提高为用户服务的工作。

结论

为使无中继器的距离愈来愈长的业务量不断增大的传输成为可能，直到21世纪，纤维将继续是扩展通信网路的基础。根据相干技术，集成光电子学和材料加工方面的可以预见到的发展，可以有把握地预言，纤维光学的应用将迅速扩大，此项技术定将增进人类的福利。

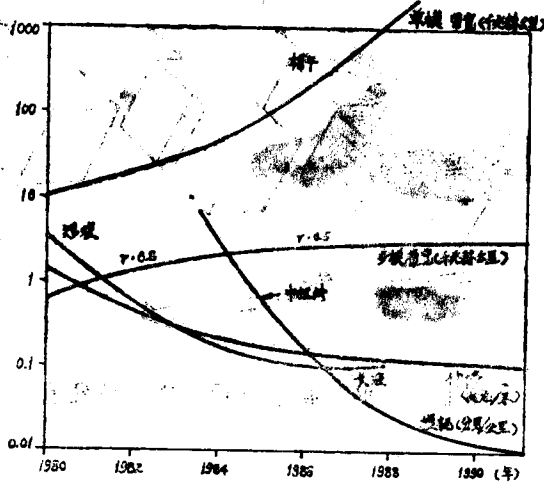


图2 到八十年代末光纤性能的进展

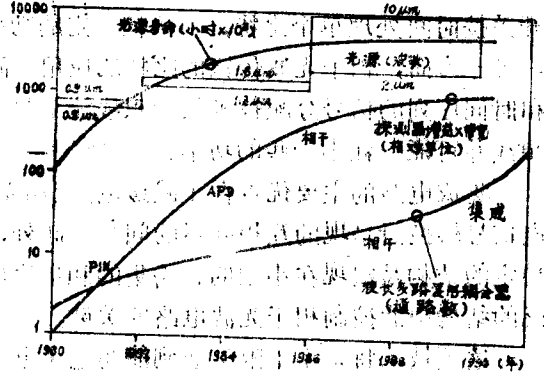


图3 光传输系统器件性能的进展

美刊 "Electrical Communication"

Vol. 58, No. 1, 1983

光纤在干线网络中的应用

英国电信公司 C. L. Lilly

1. 引言

在无线电和载波电话的整个历史中，一直是趋向使用更高的频率，这主要是通过利用更高的频率获得更大的通信容量一般要比在同一路线中用许多较低容量的系统经济得多。

随着若干重大技术的突破，已使光频（大约 3×10^{14} Hz）在干线传输系统中得到应用。

起初是Maiman在1960年对实用光源的研制，这导致了后来的大量应用在光纤传输系统中的半导体激光器光源的发展。1966年发表了高锟和Hockham的论文，他们提出了用玻璃纤维作传输媒介的设想。在这一阶段，光纤有1000dB/km数量级的损耗。下一个主要的突破是

在1970年,康宁玻璃公司生产出了损耗为 20dB/km 的光纤。

从那时起,光纤通信技术的各个方面都有了重大进展,以致研制成各种类型的通信系统,并且在世界各地实际安装。

2. 干线网络

值得弄清楚的是准确地理解“干线网络”这一名词的含义。对本文而言,是指那些能连接不同地区的二级和三级交换中心(交换台或局)之间,或是不同地区的两个二级或两个三级交换中心的电路所组成的网络。在北美洲,一般地称它为“长途电话网络”。不要把这种干线网络同那种有卫星城的大城市之内的中继(或局间)网络相混淆,这种中继网络的长度一般为 $5\sim 20$ 公里。

另一方面,干线系统的长度,可在20公里以下到300公里以上,而且在某些情况下,长度可达1000公里。根据定义,干线网络的路线是在有卫星城的大城市间传送信息的主要路线。根据这种情况,对这种路线上的系统一般要求有大的容量。以便使电路成本降到最低。

3. 数字光纤系统

光纤系统可设计成模拟传输或数字传输。然而,随着综合数字网络的出现,而且以数字方式(具有经济优点)传输时,可实现大得多的中继间距,因此,用于干线网络中的光纤通信系统总是采用数字方式,干线网络的数字光纤系统的优点可概括如下:

①与同等容量的金属电缆系统比较,它有很大的中继间距,因此,所需的中间设备较少,

②有很大的信息带宽,所以可能有大的传输容量;

③材料费用低(对光纤而言);

④光缆尺寸小,管道利用率高;

⑤串音可忽略不计;

⑥抗干扰性强;

⑦对电完全绝缘

同样,光纤系统用于干线网络中,也必然有明显的经济优点,如图1所示。

数字干线光纤系统的工作速率有两种主要的系列,如表1所示。

在给定的干线网络中所使用的系统的选择主要取决于经济条件。干线线路一般具有较高的业务增长率,安装 34Mb/s 和高于 34Mb/s 的高比特率的传输系统往往是经济的。在许多采用 2048kb/s 数字系列的国家中,认为 34Mb/s 或 140Mb/s 传输的系统是最经济的, 34Mb/s 系统适用于低增长率的干线线路,即每年增加 $10\sim 100$ 条电路的线路,而 140Mb/s 系统更适于较高增长率的线路,即每年增加100条电路以

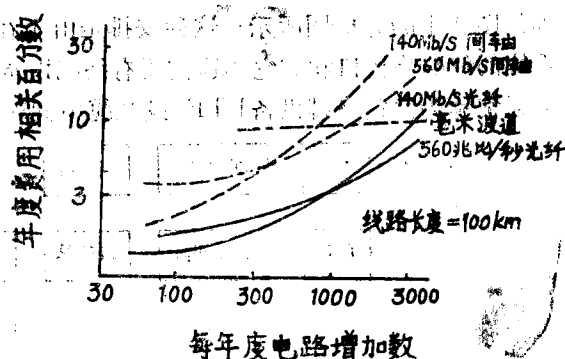
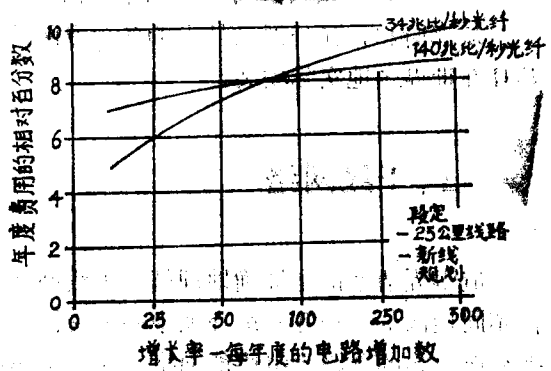


图1 不同线路传输媒介的费用比较

上的线路，经济比较的典型曲线示于图2。

表1 CCITT数字系列

按2048kb/s一次群复用的系列	按1544kb/s一次群复用的系列
2048	1544(T1)
8448	6312(T2)
34368	32064
139264	44736(T3)



类似的原理适用于1544kb/s数字序列的系统，尽管对速率很高的系统，即280Mb/s或更高的系统，要求有高得多的增长率，但在给定的线路上，这种系统仍然是很经济的。看来45Mb/s的T3系统对于大多数干线线路是很受欢迎的。

光纤系统的经济性也是系统设计的函数。传输系统一般地由终端设备，中间中继器和互连的光缆构成。对于给定的线路来说，除了通过对每种应用采取最合适的光缆设计以外，是不能降低光缆费用的，然而，如果中间中继器间的间距可以增加，因而，减少所给线路中需要的中间中继器的数目，那么，整个设备费用就可大为降低。由于这种原因，所以大量的研究和发展的努力都放在尽量扩大中继间距方面。

4. 系统结构

在对于干线系统设计进行详细讨论之前，也许有必要明确本系统的结构。典型系统总的安排如图3中的方框图所示。这种安排是由于在系统的每端为接口和其它用途需要有终端设备（通常称为线路终端设备LTE或光缆中间连

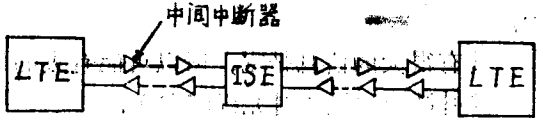


图3 典型系统结构图 LTE=线路终端设备；TSE=中间站（局）设备

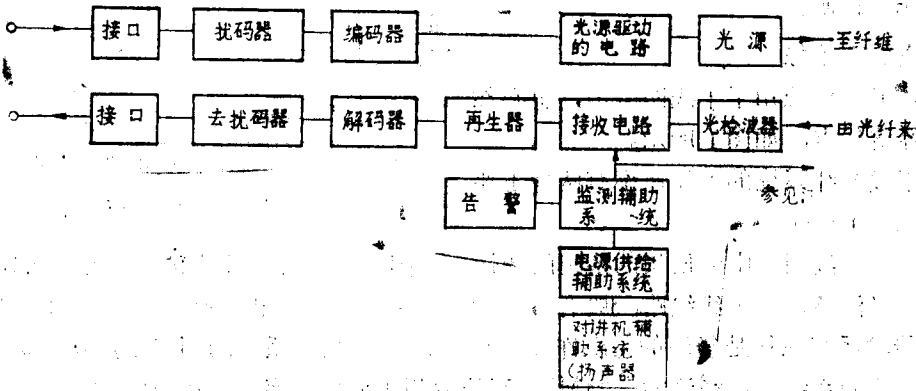
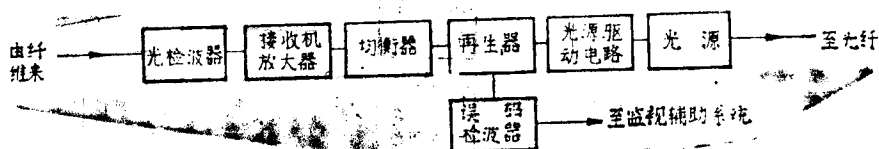


图4 典型线路终端设备方框图

接设备LCIE)。在路线长度超过了设计的中继间距时,需要有中间中继器。这些中继器可装在线路中间建筑物内,或在地下的设备箱内,在某些架空线路中,中继器可装在电杆的顶端。对于那些没有将中继器设置在地面建筑物内的系统,就必须要对中继器供电,这通常是采用电源供给辅助系统。在这种情况下,往往要利用线路之间的地面建筑物向邻近的中继器供电。选择中继器的间隔使得中继器能安装在地面建筑物内,并就地供电,这一优点真是太明显了。

构成终端设备和中继器设备的方框图如图4和图5。在本文的第6节中对它们有较详细的讨论。



5 典型中间中继器方框图

5. 整个系统的设计

在对系统的明细特性进行分析之前,所必须确定的那些较基本的参量示于图6。设计程序常常是一种反复的过程,要对设计数据连续反复地处理,直到得到最佳的系统设计方案为止。然而,最初往往是先确定系统的工作速率。过程的确定将以第二和第三节所叙述的经济因素和工作因素为基础。工作速率一经确定,就自动地提出了如CCITT所建议提出的接口数据和系统性能的数据。

由此而推断的中继间距可以不一定是技术上可实现的最长距离,这是由于为得到长的中继间距必须使用质量很高的光纤,这种光纤常常比质量较低的光纤昂贵得多。这种决定主要由所涉及到的经济因素和工作因素来确定。

渐变型多模光纤有许多优点,但使用这种光纤时所能达到的中继间距,在较高速率时,要受到可达到的纤维带宽限制,纤维带宽则主要受纤维中空间模分布产生的脉冲展宽限制。假如存在有不利于带宽增加的定律,那么上述问题就是一个特殊问题。对于每根有相同模带宽的若干根纤维连接而成的一个中继段而言,它的整个带宽 B_t 的简单表示式如下:

$$B_t = B_1 L^{-E}$$

其中: B_1 : 每根纤维的模带宽;

L : 所连接纤维的总长;

E : 纤维模带宽长度相关函数。

考虑到纤维间的均衡效应的更复杂的表示式在参考文献[12]、[13]中发表过。

E 值的范围在0.5~1.0之间,在某些情况下, E 值可降到0.3。对所能得到的总的中继间隔来说,实际上采用的 E 值可能有很大的差别。

特别是光源有大的谱线宽度时,纤维带宽还会受到材料色散效应的限制。

选择群时延速度最小以及材料色散经过零点的波长工作,例如1300毫微米左右,就可使材

料(模内)色散的影响减至最小。用1300毫微米工作也与多模纤维的衰减特性中的介电损耗窗口一致,例如图7中所示。从这个实例中可看到,1300毫微米处的损耗是0.65分贝/公里,它大约是850毫微米处损耗值的四分之一。

采用多模渐变型光纤的第二代干线系统是在800~900毫微米范围工作的,这主要是因为在这个波长范围工作的光电器件易于得到。然而,用1300毫微米左右的波长工作的优点已非常明显,因此当前在干线网络中开始安装的是用1300毫微米工作的第二代系统。

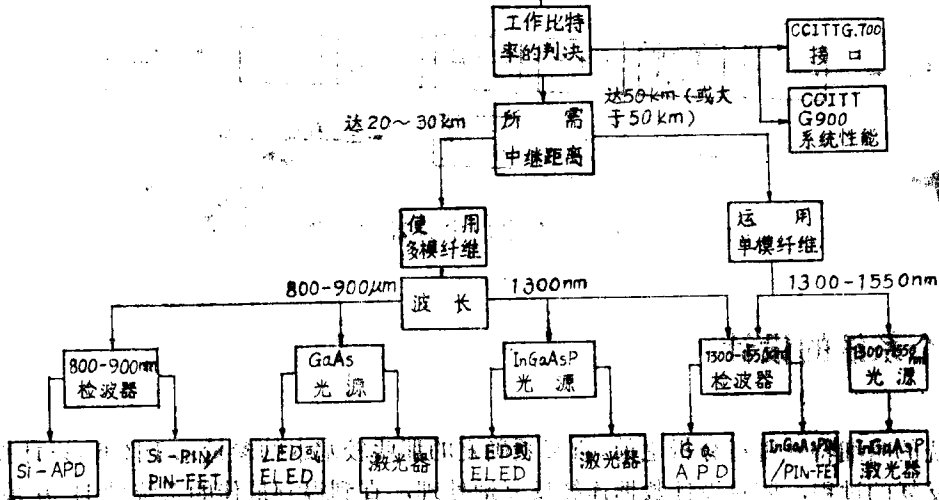


图6 某些基本系统设计的方案

由图8可见,使用渐变型光纤时可达到的中继间距随系统的比特率而改变。用850~900毫微米范围工作的系统一般在比特速率达100Mb/s左右时,衰减就受到限制,其次模色散才是主要的限制,而且中继间距也因此而大大地缩短。在多模光纤上用850毫微米波长以34Mb/s和140Mb/s速率工作时,干线系统的中继间距分别可达13和8公里。在用1300毫微米工作时其衰减只有用850毫微米工作时 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$,可使中继间距增加2~3倍(受到任何带宽的限制)。

假若由于经济方面的原因和/或工作方面的原因,要求中继间距超过30公里,那么一般就需要采用单模光纤。在单模光纤中,普遍感兴趣的有两个传输窗口,即1300毫微米和1550毫微米。在1300毫微米时衰减一般为0.5分贝/公里,在1550微米时,衰减一般为0.3分贝/公里。在本文所考虑的系统中,单模光纤的模色散不是主要的,而材料和波导色散却占支配地位。通过改变纤芯的尺寸和合适地给纤芯掺杂,材料色散为零的波长可以改变并可有效地消除波导色散的影响。可以使总的合成色散为零的波长定在1300~1550毫微米范围内的任意一点与有最小衰减的波长相对应。然而,这种改变能引起1550毫微米处的损耗增加,而与1300毫微米处的损耗相当。这种改变也通常要求光纤芯径减小,这样一来就会产生较高的接头损耗。用于干线网络中的首批单模系统将以1300毫微米工作,其主要原因是这个波长时间光源易于得到。

按上述的衰减值和色散值,在干线系统中可实现50~70公里的中继间距,如图8所示。

某些试验结果例于表 2。

表 2 某些实验系统结果

系统光纤类型		渐变多模		单 模		
比特率 (Mb/s)		100	400	100	400	800
光源	激光器类型	InGaAsP/InP	GaAlAs	InGaAsP/InP		
	波长 (nm)	1295	850	1510		
	谱线宽度 (nm)	1	1	1	3	3
	入射功率 (dBm)	-5.3	-6.5	-7.8	-4.7	-4.0
光纤	平均损耗 dB/km	0.6	2.6	0.5		
	色散	1.3GHz·km	1.3GHz·km	16ps/km/nm		
光检测	器件类型	Ge-APD	Si-APD	Ge-APD		
	量子效率	40-70%	65%	40-70%		
	附加噪声系数	0.8-1.0	0.3	0.8-1.0		
已达到的中继间距 (km)		52.6	8	58	20	40
在 $P_r = 10^{-11}$ dBm 时平均接收光功率		-38.7	-38.5	-39.5	*	-29.0

• 激光器模分配噪声的最低影响

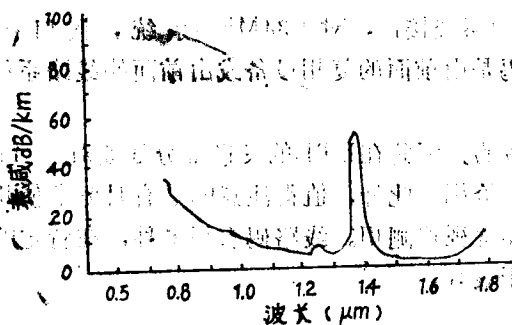


图 7 38 km 渐变光纤的的衰减图

在图 9 中用图解法表示出通用的功率预算图。它描述了激光器和发光二极管的发射功率范围，以及典型的接收机最小接收功率（假定一个中继段的误码率为 10^{-9} ）

按这些数据，就能确定特定的光电器件在给定的误码率情况下光源与接收器之间的最大损耗。而后，还必须考虑系统设计补偿的影响与系统富余度的影响。

系统设计补偿包括系统设计中必需有容差的那些参量，如色散补偿、激光反射、激光器

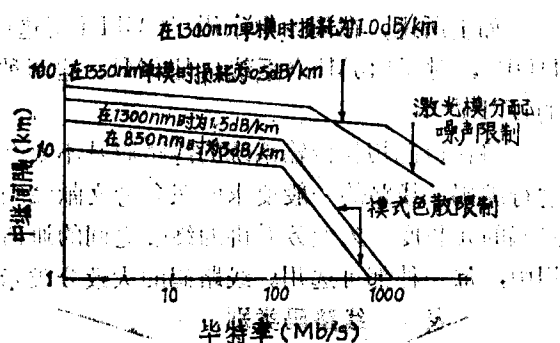


图 8 中继间隔与比特率的关系曲线图

- 注意：1. 衰减数包括许可的接点损耗；
2. 模式色散限制线路假设使用的带宽附加参数 E 是等于 0.8；
3. 假设激光器谱线宽度为 4 nm；
4. 激光模分配噪声限制的假设。

接通时延、图形效应与消光比、发射脉冲形状补偿、抖动和误均衡。这些补偿在文献(23)中已有详细介绍。

总的系统富余度等于系统设计的允许极限富余度、恶化富余度和检修富余度的总和。系统设计允许容限富余度等于光纤损耗、接头损耗和连接器损耗、光源输出功率、激光图形、接收机灵敏度参量所有允许极限的允许量。系统的恶化富余度包含了分配给时间和温度对各种系统参量的影响的定量, 这些参量如纤维损耗、光源输出功率、接收机灵敏度等。最后, 系统的检修富余度是在系统寿命期限内可能需要的附加接头和检修中光缆长度更换所必须的容限。

这些各种不同的富余度的定量是一项复杂的工作。对不同的系统而言, 所采用的整个富余度的各种值已达10分贝左右。

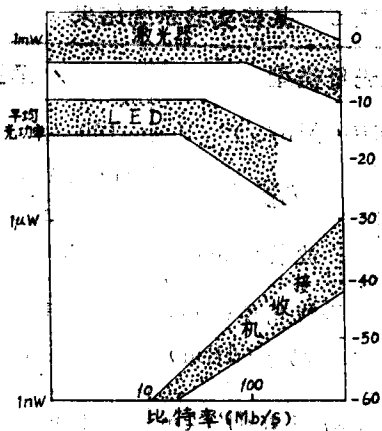


图9 光纤数字传输系统的传输边际与比特率的关系, 上边两条带形表示了激光器和LED的可利用的发射功率, 下边带形表示在 10^{-9} 误码率时所需要的接收功率

6. 详细的设计特征

6.1 线路编码

如上所述, 在图4中示出了CCITT所建议的系统接口, 对于34Mb/s系统, 接口码是HDB₃, 对于140Mb/s系统, 是CMI。这两种码是由前面的复用设备或由前面的线路系统中的LTE产生。

将接口码用作传输系统的线路码是不太合适的, 因此在LTE的发送部分还要对接口码进行编码。线路的一般要求已在参考文献[23]中给出。此外, 值得注意的是有时要求使用线路码的冗长度作为业务对讲的终端之间的通信和监视遥测用。线路码有很多种, 在特定的应用中, 每一种都可选用。线路码的大致分类示于表3。

表3 线路码类别

类 别	不一致性	实 例
基 本 型	对称(有界不一致性)	$nB(n+1)B$
	不对称(无界不一致性)	注意1
非 基 本 型	对称(有界不一致性)	Carter码
	不 对 称 (无界不一致性)	加入互补比特的扰码 和奇偶校验
特 殊		分别响应

用于干线光纤系统上的最佳线路码的各种研究^[16]表明，最好的编码是 $B(n+1)B$ 型的对称二进分組码。在34Mb/s和140Mb/s系统中分别采用5B-6B码和7B-8B码都已取得良好的结果，并且把分别响应技术推荐给更高速率的系统，例如560Mb/s和560Mb/s以上的系统。

使用扰码技术是普遍的，而且扰码器确有许多可贵之处，这是因为它能改善：

- 分組码的重新定时；
 - 定时提取；
 - 抖动累计；
 - 信号电平检测；
 - 低频截止引起的不完善性；
 - 动态范围；
 - 告警指示信号(AIS)的发送；
 - 额外数字流变化的误码检测；
- 它们还能进行码型奇偶误码检测。

对于这些改善，若采用自同步扰码器，就会牺牲误差比和误差扩展。

6.2 光源

一旦数据已进行适当编码，那么，一般地就用它们直接调制光电器件。干线光纤系统中最普遍使用的光源已在本文第五节中简单提及，并在文献[17]中作过某些详细说明。为方便起见，在表4中给出了第一代每种器件的主要特性。到目前为止，用于干线网络中的大多数大容量系统已用850毫微米波长工作，并采用了GaAlAs激光器。这是因为这种器件有较高的输出功率，并且它有高调制速率的能力，好的发射效率和窄的谱线宽度，发光二极管(LED)，尽管它比激光器的发射光功率小并且有较宽的谱线宽度，但一般地说来它便宜得多，使用也比较方便(不要求复杂的激励电路)，而且还有很可观的寿命。因此常常把LED用在例如34Mb/s和45Mb/s的低速系统。用于1300~1600毫微米长波长的器件，一般采用Ⅲ-V族的化合物，例如InGaAsP，因为在这种波长范围可利用光纤的低损耗区。

几乎都将电信号电流去直接调制半导体光源，光发射机的设计在很大程度上取决于光源的光功率/驱动电流特性。发射机的激励电路对调制光源器件的电流起开关作用。在LED的情况时，用二进制(两种电平)信号工作，这就只涉及到零或近于零电流和预置的最大值之间的转换。这种技术不能用于激光器，因为它的阈值电流是随温度变化，因此，要求有一个反馈回路，准确的调制控制可能还需要有第二个反馈回路。如系统工作比特率高达565Mb/s，而且，用于干线网络时，最好使激光器在刚好低于阈值那一点转换，以便使通断时延以及如瞬时频谱加宽之类的间接影响减到最小。因此，激光器系统一般地有一个反馈控制系统，通过这个系统光电二极管监视后端面的光功率，这个系统的反馈电流用来确保激光器在规定的设计限度内工作。当激光器在接近于阈值点工作时，在正发送“0”时，就会有少量的光发射。将这少量光功率作为发送“1”时的光功率的百分数，称之为消光比，因为它在系统设计要进行补偿，因此，它在系统设计中是必须要考虑到的。激光器中的模式的噪声、反射和模分配噪声的问题，已经有了完整的资料，它们也超出了本文的范围。

表4 典型光源器件性能摘要

器件类型	系 统 波 长 (nm)	材 料	典型耦合到 50/125mm渐变 光纤中的输 出光功率(nW)	典型调 制谱线 宽 度 (nm)	最大调 制频率 (MHz)
激光器	850	GaAlAs	1 - 3	3	500
	1300	InGaAsP	0.1 - 2	8	500
	1550	InGaAsP	0.1 - 2	10	500
ELED	850	GaAlAs	1 - 1.5	40	100
	1300	InGaAsP	0.5 - 1.5	60	200
LED	900	GaAs	0.5 - 0.8	40	50 - 150
	1300	InGaAsP	0.1 - 0.5	110	50 - 150

6.3 光纤和光缆

关于光纤和光缆的设计已在参考文献[8]、[11]、[31]中进行了详尽的讨论。用于干线系统中的光纤几乎都是采用比较普通的制造方法,如改进的化学气相沉积法(MCVD)或轴向气相沉积法(VAD)生产的石英纤维。到目前为止,所安装的工作干线系统,大多数都是采用多模渐变型光纤,如前所述,采用单模纤维有很多优点,而且在今后安装更多的单模光纤干线系统。

如参考文献[8]所提出的,目前光缆设计种类繁多,其中的大部分已超过实际要求。当然,某些合理化显然是必要的,但对这个问题的讨论已超出了本文的范围。

6.4 检测器和接收机

用于干线网络的光纤系统总是采用半导体光电二极管作为光检测器,各种类型的检测器与其性能都已在参考文献[32]中叙述。应用于检测器和接收机的理论,特别是确定接收机性能的噪声估算,已在参考文献[23]中进行了讨论。通常用于干线系统的一些检测器件的性能与特征示于表5。雪崩光电二极管(APD),由于灵敏度高,普通用于800~900毫微米范围的干线系统。然而,它却要求用高电压工作(即200~300伏),而且对温度敏感。

此外,这种检测器(APD)在长波长时,不如其它某些器件灵敏,因此,越来越普遍的运用PIN-FET技术,它克服了APD的这些缺点,特别是在1300—1500毫微米波长范围。

由光电二极管所产生的电信号必须要经过放大,在干线系统的电路设计中,普遍采用两种技术方案。一种是高阻抗设计,在这种设计中,要使光电二极管的负载电阻大到二极管的热噪声可忽略不计,这样,就由输入电容(为光电二极管电容和放大器输入电容之和)支配接收机的响应。另一种普通方法是采用互阻抗接收机设计,在这种设计中,光电二极管驱动输入阻抗较低的反馈放大器。这些方法在参考文献[23]中进行了较详尽的讨论。