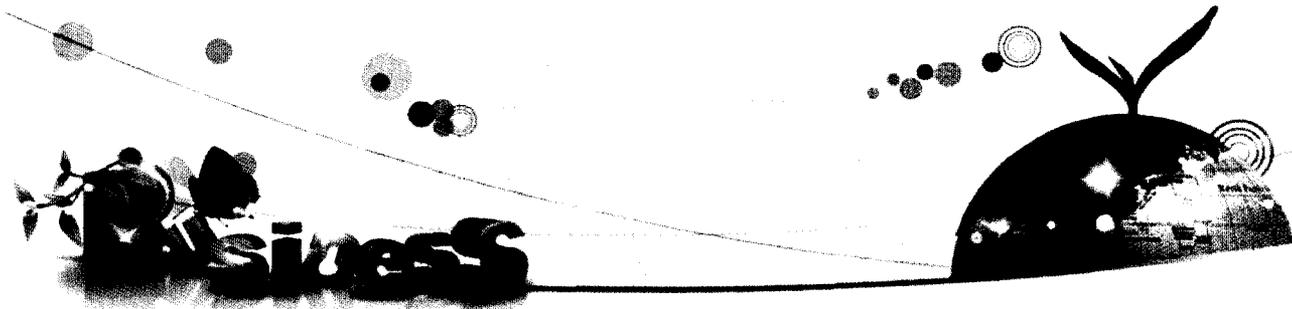


光纤技术在物联网中的应用

Application of Optic Fiber Technology to "the Internet of Things"

陈炳炎 江苏南方通信科技有限公司



【摘要】本文提出一种以光纤在线 (in line) 传感、光纤传输以及与以光纤为高速信道的互联网的结合、而形成的“三纤合一”的物感网络技术, 构成“光纤物感网”即“光纤(有线)物联网”。它与无线物联网组合在一起, 实现人类社会物理系统与互联网虚拟世界的完整整合, 构造一个覆盖世界上万事万物的“Internet of Things”。

一、光纤技术的历史回顾

瑞典皇家科学院2009年10月6日宣布, 将2009年诺贝尔物理学奖授予包括英国华裔科学家高锟在内的3位科学家。

高锟先生, 1933年生于中国上海, 1957年和1965年分别取得英国伦敦大学电机工程学士和博士学位, 曾任香港中文大学校长。世称“光纤之父”。

信息传输自古至今都是人们生活不可或缺的一部分, 从古代社会的烽火台到邮驿, 再到19世纪人们发明了电报、电话等通过电子媒介进行信息传输; 随着人们对信息需求的不断提高, 人们越来越迫切需要寻找到一种高速、便捷、传输距离长同时还要兼具制造成本低廉的信息传输媒介。1935年在美国纽约和费城之间敷设了第一根用于长途通信的同轴电缆。在上世纪50~60年代期间, 为了进一步探索未来大容量通信的传输线路, 业界曾致力于毫米波H01型模的金属圆波导管及超导同轴电缆的探索与开发, 但均未获得突破。



1966年, 在英国ITT标准电信实验室(此为ITT在欧洲的核心研究机构)工作期间, 高锟发表了一篇题为《光频率介质纤维表面波导》的论文, 开创性地提出光导纤维在通信上应用的基本原理, 描述了长途及高信息量光通信所需介质纤维的结构和材料特性。当时, 主流学者的共识是: 玻璃中光损耗太高, 光纤虽然可用在短短的胃镜导管上, 但用于长距离通信根本不可能。高锟先生却不信其邪。他对通信系统详细分析后指出: 当光损耗下降到20dB/Km时, 玻璃纤维就有实用价值。他通过对光在玻璃纤维中吸收、散射和弯曲损耗机理的深入分析后得出结论: 只要解决好玻璃纯度和成分等问题, 用熔石英制作的光学

纤维可以成为实用的光通信传输媒质。这一设想提出之后, 有人称之为匪夷所思, 也有人对此大加褒扬。但在争论中, 高锟的原发性工作在全世界掀起了一场光纤通信的革命。

在高锟原创性理论的推动下, 4年后, 美国康宁公司的工程天才Robert D. Maurer于1970年设计和制成世界上第一根低损耗石英光纤(损耗为20dB/Km, 波长为0.63μm)。他采用的方法, 是在一根芯棒上气相沉积石英玻璃, 随后抽去芯棒, 将玻璃管烧缩成光棒后拉成光纤。气相沉积时通过改变玻璃组分, 形成高折射率的纤芯和低折射率的包层的光纤波导结构, 此光纤波导结构被一直沿用至今。

1974年美国贝尔实验室的John MacChesney开发出MCVD(改良的化学气相沉积)工艺, 成为世界上第一个商用制棒技术, 迅速被世界各国采用, 及时地推动了光纤通信的实用化。

鉴于高锟、Robert D. Maurer和John MacChesney在光纤技术的奠基性工作和巨大成就, 1999年他们三人成为工程界最高奖项的NAE Charles Stark Draper

奖的共同得主。

光纤制造技术在上世纪七十年代得到长足的发展, 继美国贝尔实验室的MCVD制棒技术后, 美国康宁公司的OVD(管外气相沉积)、日本NTT公司的VAD(轴向气相沉积)以及荷兰飞利浦公司的PCVD(等离子化学气相沉积)制棒技术相继开发成功。光纤损耗在1979年已降低到0.2dB/Km(波长为1550nm时), 这已接近由瑞利散射损耗所决定的极限值了。

随着光纤制造技术发展, 光纤波导传输理论在上世纪七十年代也得到长足的发展, 从而为光纤技术的发展和实用化奠定了理论基础。光纤波导理论起源于上世纪20年代初Debye

(1910)的介质波导理论,但由于光在光纤中的损耗机理、光纤波导的弱导性、微小的光纤截面尺寸以及其它传输特性均与微波介质波导不相同,故光纤波导理论是一门独立的理论。一大批学者为此作出了原创性的贡献,有关文献浩如烟海。这里仅撷数例,以窥一斑:如Snyder A. W. (1969)和Gloge, D.

(1971)基于光纤波导的弱导性,即 $(n_1 - n_2) \ll n_1$ (n_1 和 n_2 分别为光纤纤芯和包层的折射率),将经典的模式(两重和四重)简并为线性偏振(LP)模,从而大大简化了光纤波导的理论分析;Keck, D. B., Olshansky, R. 和Petermann, K. 等学者对光在光纤中各种损耗机理的理论研究为低损耗光纤制造提供了理论依据;Jeunhomme, L., Marcuse, D. 和Gambling W. A. 等学者对光纤波导的色散性能的研究则为G. 655, G. 656等色散位移光纤的开发奠定了理论基础。

在华盛顿和波士顿之间的世界上第一条商用光纤通信系统于1981年建成。短短几十年间,光纤网络已遍布全球,至今已在全球敷设了数亿公里的光纤,成为互联网、全球信息通信的基础。光纤的发明不但解决了信息长距离传输的问题,而且极大地提高了效率并降低了成本。今天,二氧化硅光纤已成为通信系统的基石,就如同硅集成电路是计算机的基石一样。

今因光纤技术而催生的产业庞大得无法估计:从光纤光缆的制造,到光纤网络通信系统;从通信网、电视网到互联网;从打网络游戏到看高清电视,光纤已成为整个人类信息社会的基础。诺贝尔奖评委会是如此描述神奇的光纤:“光波流动在纤细的光纤中,它携带着各种信息数据传递向每一个方向,文本、音乐、图片和视频因此能在瞬间传遍全球。”

与传统的导电材料铜不同,铜是不可再生资源,再过几十年,地球上铜矿必将开采殆尽。自从西门子公司开发出第一根铜质通信电缆至今,已逾一百年。再也没有另外一百年的铜资源可资利用了。而光纤的材料,二氧化硅及其掺杂材料均是地球上取之不尽,用之不竭的物质,是大自然恩赐于人类的无穷的财富。光纤的价格之低廉也是任何其他传输媒质无法比拟的。每公里G. 652光纤价格已从初期的上千元下降到目前的七十多元人民币。今天,应用最广泛的G. 652光纤,其结构(阶跃型折射率剖面)之简单,其性能之优越,价格之低廉已无有能望其项背者。G. 657光纤的出现,也将原先人们对光纤“脆弱易折”的观感一扫而空。光纤到户(FTTH)时代的来临,已指日可待。

二、光纤通信与光纤传感

光纤技术正在向两个方向发展:第一波是光纤通信技术,第二波则是随之而来的光纤传感技术。光纤通信技术历经30余年的发展,日臻成熟;光纤传感技术则是方兴未艾。后者也在借助光纤通信技术的成果处于迅速发展之中。

进入二十世纪90年代后,由于光纤放大器及光纤波分复

用技术的迅速发展,使光纤通信的通信距离和通信容量的拓展发挥到极致。G. 653光纤迅速被G. 655, G. 656光纤赶出历史舞台。目前,单一波长的传输容量已从2.5Gbit/s, 10Gbit/s发展到40Gbit/s., 并已开始160 Gbit/s的研究。DWDM的波长间隔已从1.6nm, 0.8nm减小到0.4nm(50GHz)。全波光纤的技术突破,使1385nm波长的水峰损耗消失,遂令第五波段(1360nm-1530nm)“天堑变通途”,使单模光纤的有效使用波段扩展为从1280nm-1625nm的石英光纤低损耗区的全部波段。可以想见,在一根光纤上同时传送千万路电话已不再是人类的梦想的了。

光纤传感技术是与光纤通信技术相伴而生的光纤技术发展的又一方向。它已由零星研究走向集中开发、由军用催生民用、由单点监测技术发展到分布式网络监测技术,其应用领域之广、其市场潜力之大、其发展势头之猛已令万众瞩目。与传统的传感技术相比,光纤传感器的优势是本身的物性特性而不是功能特性。光波在光纤中传播时,在外界因素,如温度、压力、位移、电场、磁场、转动等的作用下,通过光的反射、折射和吸收效应,光学多普勒效应、声光、电光、磁光、弹光效

应, Sagnac效应和光声效应等原理,使表征光波的特征参量:振幅、相位、偏振态、波长等,直接或间接地发生变化,因而可将光纤用作敏感元件来探测各种物理量,此即光纤传感器的基本原理。此外,光纤还有各种衍生的传感功能,例如,光纤光栅周围化学物质浓度的变化通过倏逝场影响光栅的布拉格波长,利用这种特性,通过对光纤光栅进行特殊处理,可制成探测各种化学物质的光纤光栅化学和生物化学传感器。与普通光纤光栅相比,长周期光栅对光纤包层外材料的折射率变化更敏感,因为长周期光栅将正向导模耦合到几个正向包层模,围绕包层的材料折射率的任何变化都会改变透射光波的性质。将光纤光栅涂上特殊的活性涂覆层,可测量低浓度(10⁻⁹级)的目标分子。此类光纤传感器可用于航天器的氢气漏泄检测,油气管道的碳氢化合物的漏泄检测,煤矿

中的瓦斯检测等等。

而光纤本身又是光波的传输媒质,这种“传”、“感”合一的特征所带来的优势,堪称无可匹敌。基于瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射原理的OTDR, BOTDR及ROTDR一类的分布式光纤传感器以及基于双光束干涉的光纤传感干涉仪,如马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪、迈克尔孙(Michelson)干涉仪、萨格奈克(Sagnac)干涉仪等,其光纤传感臂上的每一点既是敏感点又是传输介质。即使对于基于多光束干涉的准分布式光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot)传感器,以及近年来发展最为迅速的光纤光栅传感器而言,前者的工作原理是通过两个光纤端面作为反射面之间的距离变化来测量被测量的变化,后者则是利用光纤材料的光敏性,即外界入射光子和光纤纤芯内锗离子相互作用引起折射率的永久性变化,从而在光纤纤芯内形成空间相位光栅所构成,因此光纤光栅是在光纤纤芯中形成。两者



均是光纤本身的一个集成部份。与光纤的可熔接形成低插入损耗的联接，此类光纤传感器的在线 (in line) 特征，使其与光纤传输有天然的兼容性，可以替代传统的分立和薄膜型光无源器件，从而为全光通信系统和光纤传感网络提供巨大的设计灵活性。

以互联网为代表的计算机网络技术是二十世纪计算机科学的一项伟大成果，它给人们的生活带来了深刻的变化，然而在目前，网络功能再强大，网络世界再丰富，也终究是虚拟的，它与人们所生活的现实世界还是相隔的，在网络世界中，很难感知现实世界，很多事情还是不可能的，时代呼唤着新的网络技术。光纤的这种神奇的、在线的传感、传输特性以及与以光纤为高速信道的互联网的相结合，正迎合时代的需求，可以构成全新的物感网络技术，笔者敢于断言：在不久的将来，这种三纤合一的、新的光纤传感网络将给人们的生活带来革命性的变化，从而使光纤技术的发展再一次迈向新的高峰。

三、从互联网时代到“物联网”时代

传统的物联网 (The Internet of things) 的定义是：通过射频识别 (RFID)、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备，按约定的协议，把任何物品与互联网连接起来，进行信息交换和通讯，以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络。物联网的概念是在1999年提出的。物联网就是“物物相连的互联网”。这有两层意思：第一，物联网的核心和基础仍然是互联网，是在互联网基础上的延伸和扩展的网络；第二，其用户端延伸和扩展到了任何物品与物品之间，进行信息交换和通讯。

物联网可分为三层：感知层、网络层和应用层。

感知层包括二维码标签和识读器、RFID 标签和读写器、摄像头、GPS、传感器、终端、传感器网络等，主要是识别物体，采集信息，与人体结构中皮肤和五官的作用相似。

网络层是物联网的神经中枢和大脑信息传递和处理。网络层包括通信与互联网的融合网络、网络管理中心、信息中心和智能处理中心等。网络层将感知层获取的信息进行传递和处理。

应用层是物联网的“社会分工”与行业需求结合，实现广泛智能化。应用层是物联网与行业专业技术的深度融合，与行业需求结合，实现行业智能化，这类类似于人的社会分工，最终构成人类社会。

物联网形成的步骤：

(1) 对物体属性进行标识，属性包括静态和动态的属性，静态属性可以直接存储在标签中，动态属性需要先由传感器实时探测；

(2) 需要识别设备完成对物体属性的读取，并将信息转换

为适合网络传输的数据格式；

(3) 将物体的信息通过网络传输到信息处理中心（处理中心可能是分布式的，如家里的电脑或者手机，也可能是集中式的，如中国移动的IDC），由处理中心完成物体通信的相关计算。

根据上述定义的物联网又称无线物联网。其用户端以移动物体之间的沟通为主；例如，

1. 智能家居

智能家居产品融合自动化控制系统、计算机网络系统和网络通讯技术于一体，将各种家庭设备(如音视频设备、照明系统、窗帘控制、空调控制、安防系统、数字影院系统、网络家电等)通过智能家庭网络实现自动化，通过中国电信的宽带、固话和3G无线网络，可以实现对家庭设备的远程操控。将家居环境由原来的被动静止结构转变为具有能动智慧的工具，提供全方位的信息交互功能。

2. 智能医疗

智能医疗系统借助简易实用的家庭医疗传感设备，对家中病人或老人的生理指标进行自测，并将生成的生理指标数据通过中国电信的固定网络或3G无线网络传送到护理人或有关医疗单位。还可提供相关增值业务，如紧急呼叫救助服务、专家咨询服务、终生健康档案管理服务等。

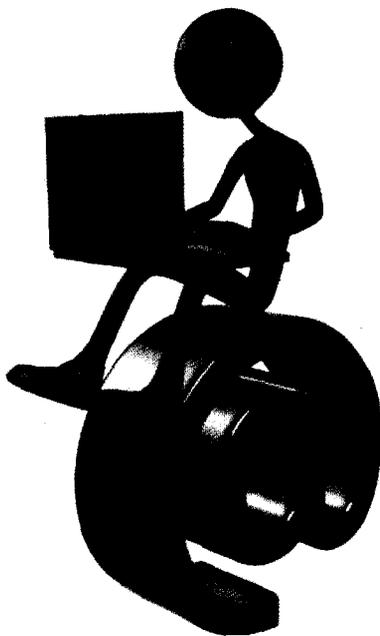
3. 智能交通

智能交通系统包括公交行业无线视频监控平台、智能公交站台、电子票务、车管专家和公交手机一卡通等业务。

公交行业无线视频监控平台利用车载设备的无线视频监控和GPS定位功能，对公交运行状态进行实时监控。

车管专家利用全球卫星定位技术(GPS)、无线通信技术(CDMA)、地理信息系统技术(GIS)、中国电信3G等高新技术，将车辆的位置与速度，车内外的图像、视频等各类媒体信息及其他车辆参数等进行实

时管理，有效满足用户对车辆管理的各类需求。



四、“三纤合一”的光纤物感网络

对于重大的固定设施为终端用户，如电网、铁路、桥梁、隧道、公路、建筑、大坝、供水系统、长距离油气管线等的监测；地震监测；煤矿中的瓦斯检测、坑体结构的健康监测；大型地下设施的温度、火灾报警；用于军事或政府机构等敏感地区 and 设施的入侵定位、安防预警；军事中作为反潜声纳核心部件的水听器等等，采用上述无线方式实现的物联网显然是勉为其难的了。而用植入上述被测物体的各种光纤传感器得到所需被测参数，并以光纤传输到数据控制中心，并接入互联网，形成光纤物感网络。此“光纤物感网络”概念的问世，打破了之前的传统思维。过去的思路一直是将物理基础设施和IT基础设施分开：一方面是机场、公路、建筑物；而另一方面是数据中心、个人电脑、宽带等。而在“物感网”时代，钢筋混凝土设

施通过光纤传感网络、将与宽带整合为统一的基础设施,在此意义上,基础设施更像是一块新的地球工地,世界的运转就在它上面进行,其中包括经济管理、生产运行、社会管理乃至个人生活。

与语音通信技术中分为有线(固定电话)和无线(移动电话)通信相类似,物联网也应当根据终端用户的类型分为有线(光纤物感网)和无线物联网两类。

光纤物感网是“光纤传感”、“光纤传输”和“光纤互联网”的三合一的系统。

其优点如下:

1. 光纤传感器与传统的非电量电测法的电传感器相比,具有显著的优点:因为它是导光元件,所以完全不受电磁干扰,不受雷击,不受核辐射影响,可在煤矿等易燃易爆的环境中工作。

2. 光纤传感器与传统的传感器相比,具有更高的检测灵敏度,例如,典型的光纤光栅布拉格波长随温度、压力和应变变化的灵敏度分别为 $10\text{pm}/\text{k}$ 、 $3\text{pm}/\text{Mpa}$ 和 $1.2\text{pm}/\mu\text{e}$;BOTDR(AQ8603)的应变测量精度则可达 $\pm 0.003\%$ ($30\mu\text{e}$)。

特别是相位调制型光纤传感器具有极高的检测灵敏度,因光电探测器无法直接感知相位,故必须采用干涉技术使相位变化转化为强度变化,才能实现物理量的检测。其可得到最小相位变化为 10^{-7}rad 的测量精度。如采用保偏光纤,信号检测系统可测出 $1\mu\text{rad}$ 的相位移,则对每米光纤的检测灵敏度:对温度为 10^{-8}C ,对压力为 10^{-7}Pa ,对应变为 $10^{-7}\mu\text{e}$,动态范围可达 10^{10} 。对于某些波长检测型的光纤传感器,当波长分辨率达到微米量级后,还可通过计算机数据处理将微米级的光波长细分到任意多的分数,进一步大大提高检测灵敏度。

3. 鉴于光纤“传”“感”合一的特性,而形成的分布式传感系统,可在长距离的线路上进行连续的传感检测和被测信号的传输。这是任何其他无线检测手段所无法企及的。

4. 与无线检测方式相比,光纤物感网不受大气候影响,不受地理环境干扰。在军事应用中有良好的保密性。

5. 光纤物感网可移植业已成熟的光纤通信的技术成果,特别是网络技术。例如多传感器和传输光纤的连接技术;多传感器的解调技术,如时分复用,波分复用,频分复用,空分复用等技术,等等。

6. 光纤通信技术中非常成熟的光学元器件均可信手拈来,为我所用。它们是:光源;如半导体激光二极管、LED、DFB激光器、光纤光栅激光器等,光电探测器;如PIN管、APD管等,光纤无源器件;如光纤耦合器、光纤隔离器和环行器、光开关、波分复用器等。

下面举例来描述光纤物感网的使用情景:

1. 地震监测

由于具有长距离遥测、耐恶劣环境、灵敏度高、易于联网等突出优点。光纤传感器可能是目前最好的地震监测手段,一旦在地震带附近建立起永久的可以监测地震的光纤传感器网络,就可以及时地监测地下的异常情况,对可能发生的地震发出预警,最大可能地避免人员伤亡和财产损失。光纤传感器可埋入温度高达 250C 以上的地层深处,因此可测量距离达数百公里。可用于检测地震波、地质板块内部应力、温度、位移和倾斜、地下流体压力、地下磁场等地下物理量的动态变化。

分布式光纤传感器除具有结构简单、灵敏度高、耐腐蚀、电绝缘、防爆性好、抗电磁干扰、光路可挠曲、易于与计算机连接、便于遥测等优点外,其最显著的优点就是可以测出光纤沿线任一点上的应变、温度和损伤等信息,实现对监测对象的全方位立体监测。因此,研究和开发分布式光纤应变/温度传感技术对活动块体边界带(或断裂带)的监测具有重要意义。

将被测的各种参数经光纤网络传输到数据控制中心进行记录和分析,并与互联网相联,分享全球有关地质变动的资料,相互印证,分析比较,监测地震预兆。

2. 煤矿安全

煤矿生产中的安全问题日益突出,矿井瓦斯浓度达到 $5\%\sim 16\%$ 就具有爆炸的危险性。因此实时监测矿井瓦斯浓度,及早采取预防措施,不仅能减少国家财产损失,而且能有效保障矿井工人的人身安全。采用高精度、长期可靠的光纤瓦斯传感器、光纤温度和应变传感器来检测矿井中的瓦斯浓度、温度、矿压、微震等参数,用以预测预警和防控煤矿安全生产中的瓦斯、火灾、透水及冲击地压等主要煤矿灾害。并采用光纤宽带监

控系统。分布式网络化煤矿综合监控系统主干传输平台可采用基于IP的工业以太网光纤通信技术,将地面以太网技术通过矿用光缆直接延伸至煤矿井下环境,为矿井构筑了先进、可靠、标准、高速、宽带、双向的综合信息传输平台,使得矿山安全和综合自动化系统的各种监控设备、自动化过程控制设备、语音通讯设备、图象监控设备等都以IP方式接入。并与煤矿企业的Internet / Intranet整体架构实现无缝连接。

3. 光纤水听传感网络

光纤水听传感网络是一种建立在光纤传感和传输合一基础上的水下声信号传感系统。它通过高灵敏度的光纤相干检测(如马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪、迈克尔孙(Michelson)干涉仪、萨格奈克(Sagnac)干涉仪等),也可用光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot)传感器或光纤光栅传感器,将水声信号转换成光信号,并通过光纤传至信号处理系统提取声信号信息。光纤水听传感网络主要用于海洋声学环境中的声



传播、噪声、混响、海底声学特性、目标声学特性等的监测。它既可用于海洋、陆地石油天然气勘探，也可用于海洋、陆地地震波检测以及海洋环境检测，它又是现代海军反潜作战声纳系统的核心部件。

光纤水听器灵敏度高，带宽宽，频响特性好，可以响应甚低频；耐静水压；全光，水下无任何电子设备，稳定性高；光缆轻巧，耐高温，抗腐蚀性；传输距离远，动态范围大；可利用光纤多路复用技术，构成大范围阵列。这些特点使基于光纤水听器的传感器网络与信息传输网络一体化，系统结构大为简化，当光纤水听传感网络进一步与互联网连接后，将在大幅度提高系统性能的同时，减少了系统的工程代价。

采用Mach-Zehnder或Michelson干涉仪的光纤相位检测技术具有极高的灵敏度，但需解决偏振衰落及相位衰落等技术问题；而在Sagnac干涉仪中不需要考虑相位衰落和光源相位噪声问题，偏振衰落问题也可通过在干涉仪中插入Lyot退偏器的方法得到很好解决，因此基于Sagnac干涉仪的光纤水听器与基于Mach-Zehnder干涉仪的光纤水听器相比有其独特优势。

在水听器应用中，由于水下声场的复杂性，单元水听器无法获得目标的详细信息，必须依靠超大阵元数目的高度复用的传感器阵列。通过水听器阵列完成声场信号的波束形成，实现对水下目标的定位与指向。为降低成本与体积，多路复用技术被广泛的用到了水声信号传输领域。多路复用技术的使用对水声信号的处理能力提出了更高的要求。需要处理的是水听器阵列的海量信号，对处理速度要求高。通常可采用一种基于FPGA和DSP的光纤传感信号实时处理系统，来完成多路复用信号的解复用以及实时快速解调。

五、传感光纤与传感光缆

用来制作光纤传感器的光纤称为传感光纤。传感光纤的主要类型就是常规的单模光纤或多模光纤，例如，BOTDR光纤温度和应变传感器使用单模光纤，而用于ROTDR光纤温度传感器的是多模光纤；用于相位调制型的光纤Sagnac干涉仪的也可采用保偏光纤；根据普朗克定律通过辐射量检测来实现测温的光纤温度传感器采用大芯径光纤；而用于制作光纤光栅的则是纤芯高掺铒的光敏光纤。

在光纤传感网络中，传感光缆是一个非常重要的部件。它不仅是联接光纤传感器和控制中心的传感信号的传输介质，在分布式光纤传感系统（如OTDR或干涉型传感系统）中，同时兼任传输和传感两种功能。因而它的结构形式和功能可能与常规的通信光缆很不相同。例如，在传统的通信光缆中，光缆必须设计成将光缆中的光纤与外界应力相隔离，也就是说光纤不应直接受外力影响，以保证光缆中光纤的长期使用寿命。而在应变型传感光缆中，必须让外界应力直接传递到光缆中的光纤上，从而实现应变测量。这类传感光缆使用时需直接嵌埋于被检测应变及变形的土木结构件内部、或直接粘接在其表面。而与此

同时，还需对传感光缆中的光纤进行环境和机械保护。在某些应变型传感光缆使用中，传感光纤通过粘接剂粘合在被测的金属或混凝土基板上，光纤与基板之间有光纤涂层和粘接剂两层物质相隔，除了要求这些物质的物理性能，如热胀系数、杨氏模量、泊松比等尽量匹配外，光纤和其涂层之间必须有良好的结合力，否则在应变测量中，因光纤与涂层之间的滑移会产生测量误差。常规的光纤的紫外固化丙烯酸树脂涂层的剥离力为1.3~8.9N，这对于上述应变测量远远不够，必须开发出高剥离力的光纤涂层。

又如，在BOTDR分布式传感系统中，由BOTDR发出的布里渊散射光通入单模光纤中传输时，当单模光纤受到应力而产生应变或温度变化时，光纤中的布里渊散射光就会产生频移，通过频移的计算可得出光纤所受应变和温度变化数值。为了区分温度和应变所导致的不同测量结果，可设计一种双芯光缆，在此光缆中，一根光纤以松套状态，另一根光纤以紧套状态置于光缆中。这样，在测量中，从松套光纤可测得温度变化数值，而紧套光纤同时测得温度和应变数值，从后者减去前者数值，即可得应变数值。

另外，常规通信光缆使用温度范围为-40℃（极端温度为-60℃）~+60℃。而传感光缆的应用范围极为广泛，有时可能在-150℃~+300℃的极端温度下使用，这时，光纤和光缆的材料和结构都会有很大变化。例如采用聚酰亚胺涂层代替丙烯酸树脂涂层，用氟塑料代替聚烯烃作为光缆结构材料等等。

从上述几个例子可见，传感光缆的设计和制造远比常规通信光缆复杂。而有了高质量的传感光缆才能将光纤传感系统的优点更充分发挥出来。这对光纤光缆行业来说，其任务还是任重道远的。

六、结语

光纤传感网络，就是把光纤传感器嵌入和装备到电网、铁路、桥梁、隧道、公路、建筑、供水系统、大坝、油气管道等各种重大工程设施中，通过光缆连接，形成所谓“光纤传感网络”，然后将此“光纤传感网络”与现有的互联网整合起来，构成“光纤物感网”即“光纤(有线)物联网”。它与无线物联网组合在一起，实现人类社会与物理系统的整合。在这个整合的网络当中，存在功能强大的中心计算机群，采集和存储着物理的与虚拟的海量信息，通过分析处理与决策，完成从信息到知识、再到控制指挥的智能演化，进而实现整合网络内的人员、机器、设备和基础设施，实施实时的管理和控制。在此基础上，人类可以以更加精细和动态的方式管理生产和生活，达到“智慧”状态，从而提高资源利用率和生产力水平，改善人与自然间的关系。在这“智慧地球”的建设过程中，这种三合一的、新的光纤传感网络将为之作出革命性的贡献，从而使光纤技术的发展再一次迈向新的高峰。

