

# 超高速率超大容量建设用光纤技术

[摘要] 超高速率、超大容量、超长距离的光纤传输技术是解决通信网未来带宽需求的关键技术之一。在系统单信道速率向 100 Gb/s 甚至 1 Tb/s 演进过程中,传统的 G.652.D 低水峰光纤仍将发挥重要作用。超高速率超大容量光纤通信在器件、调制格式、接收检测方式等方面的创新,对通信光纤的性能提出了新的要求。进一步降低光纤损耗可以延长中继距离;大有效面积光纤可以提高注入信道光功率,降低非线性效应,提高链路光信噪比(OSNR)。多芯光纤和少模光纤,可以增加空分复用维度,是未来突破光纤香农极限的研究方向之一。

[关键词] 光纤通信;超低损耗光纤;大有效面积光纤;少模光纤;多芯光纤

随着互联网应用基础上的移动电话用户数和固网接入用户数的持续增加,以及这些用户的传输需求从语音和文字发展到图片、视频和其他类型的超大数据流,人们对网络带宽的需求日益迫切。因此造成作为基础的光纤传输网面临巨大的扩容压力。"宽带中国"战略提升了运营商投资光纤网络的兴趣,这些投资将在未来几年内给运营商带来直接的回报。但由于投入产出巨大的剪刀差,电信业的毛利率在逐年下降,电信运营商越来越关注网络建设成本。光纤通信技术在 21 世纪初依然保持着高速发展的势头,通信容量预计在未来 10 年左右将达到单根光纤的香农极限[1]。因此光纤厂商需要根据光纤通信技术的变化研发光纤新技术,更好地服务于通信光纤网络的建设。而从运营商角度考虑,如何利用好已大规模应用的 G.652.D 光纤来实现超大容量、超高速率系统传输技术的演进?如何选用新的光纤技术来实现未来网络扩容和投资回报的平衡?这些将是本文探讨的问题。

## 1 超高速率超大容量传输系统

### 1.1 实际的传输系统

目前的光纤传输网络建设主流设备多是 40G 的波分复用系统,也存在部分 100G 的波分复用系统在建商用工程。这些工程采用了多种光纤光缆,如 G.652 光纤、LEAF 光纤、G.655 光纤、超低损耗光纤制作的光纤复合架空地线(OPGW)光缆等。特别是一些实际传输工程是在已经安装的 G.652.D 线路上实现的,这将在最大程度上保护运营商的资产安全。例如中兴通讯在 2012 年 OFC 会议上报道了采用 8 个信道,单信道 216.4 Gb/s 的速率,实现了 1 750 km 普通单模光纤上的传输系统,频谱效率达到了 4 b/s/Hz[2]。美国 Verizon 公司在 2012 年 OFC 上会议报道了采用超级信道技术在 1 503 km 普通单模光纤中传输了 21.7 Tb/s 的工程[3]。8×216.4 Gb/s 大容量传输工程现实中链路(总长 1 750 km 的 G.652 光纤)具体情况如表 1、图 1 所示。

表 1 传输工程概况一览

运营商	工程描述	光纤链路	设备供应商
Deutsche Telekom (Germany)	8 × 216.4 Gb/s WDM 传输	已安装的 1 750 km 的 G.652 光纤	ZTE
Verizon Communications (USA)	总容量是 21.7 Tb/s 的 PDM-8QAM/QPSK	已安装的 1 503 km G.652 光纤	NEC Laboratories America, Inc
SEACOM (South Africa)	混合制式: 包含 500G 超信道、2 路 40G、1 路 100G 和 1 路 250G 超信道	混合光纤链路, 含 16 段 G.655 光纤、23 段 G.654 光纤、25 段 G.652 光纤, 光纤链路总长为 6 042 km	Infinera
中国能源建设集团有限公司	青藏正负 400 kV 直流联网工程配套光纤通信工程	1 038 km 超低损耗光纤制作的 OPGW 光缆	通光集团

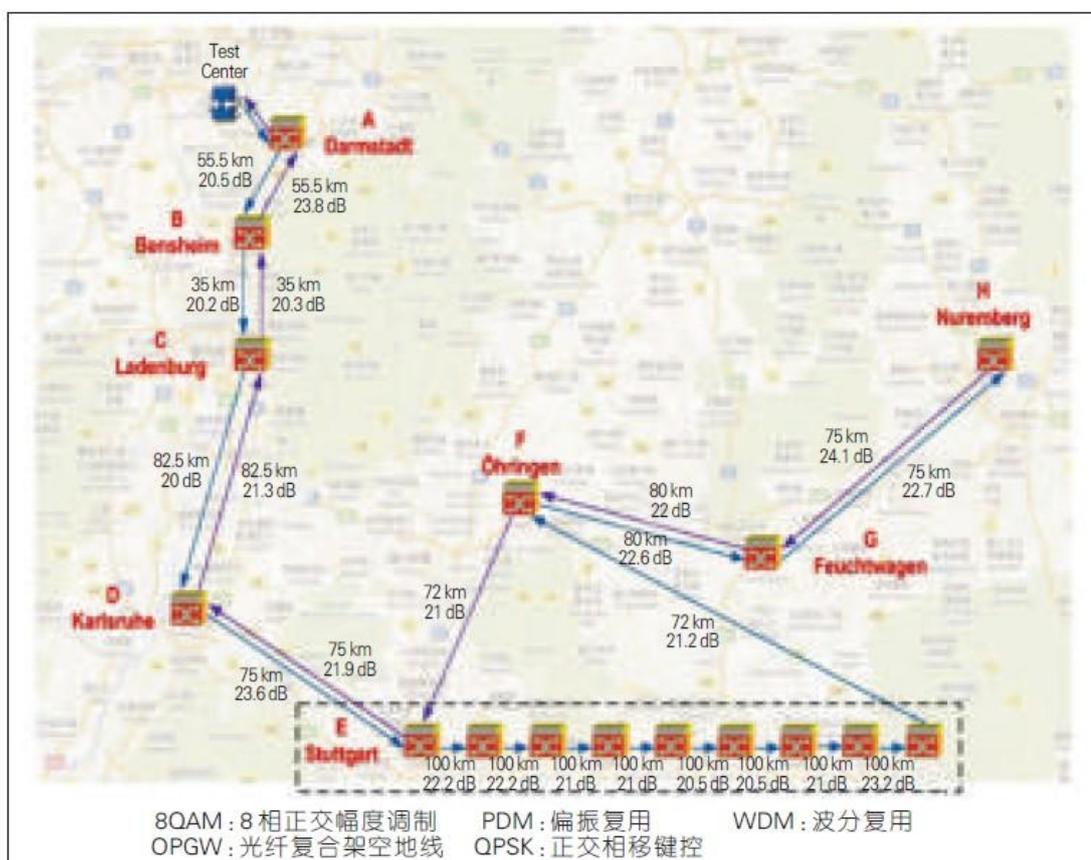


图 1 8 × 216.4 Gb/s 大容量传输工程的实际链路

## 1.2 大容量传输实验

构建超高速率、超大容量、超长距离的光纤传输网有多种技术实现方式。从已经报道的传输实验来看，它们在技术上各有特色，在实验中也选择不同类型的光纤，以达到速率、容量和距离上匹配的传输目的。例如 Alcatel 公司在 2002 年报道成功实现了 256 个信道，单信道 42.6 Gb/s 的密集波分复用 (DWDM) 技术在常规单模光纤中传输 100 km，系统总容量已经可达到 10.24 Tb/s 的实验，其频谱效率是 1.28 b/s/Hz[4-6]。而光孤子通信技术则是采用超短光脉冲，由于光孤子在光纤的反常色散区中群速度色散和非线性效应相互平衡，因而，经过光纤长距离传输后，光孤子波形和速度都保持不变。2001 年朗讯公司报道成功实现了采用光孤子技术在 4 000 km 的色散管理线路上的太比特大容量的传输实验[7]。光时分复用

(OTDM) 是增加通道数据速率的一种实现方法。2010 年 ECOC 会议上 Pengyu Guan 等人报道了采用 OTDM 方法实现单信道 1.28 Tb/s 传输 525 km 由色散管理链路构成的传输线路。该文中提到的信号源是 1.6 ps 锁模激光器经过啁啾脉冲压缩到 600 fs 的超短光脉冲。光信号脉冲经过 525 km 光纤传输后脉冲宽度展宽到 650 fs, 在长距离传输方面存在一定的技术挑战[8]。而近几年来随着 100G 技术的标准、器件等方面的成熟, 主流技术均采用偏振复用、相位调制方法和相干检测技术。在 100G 传输技术的光纤选择方面, 采用 G.652 光纤和常规的掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大技术, 传输线路单个跨段大约在 50 km 左右, 这种配置可以实现超过 1 万公里的超长距离、单波长速率超 100G 以上、总容量超太比特的波分复用 (WDM) 传输系统。如采用 EDFA 和拉曼放大混合技术, 则可以提高跨段长度, 如 80 km, 但缺点是会降低传输系统的最大传输长度[9]。而采用超低损耗的光纤, 例如 1550 nm 的损耗典型值为 0.163 dB/km G.652 光纤, 则可以将单波长速率 112 Gb/s 的信号, 在单跨段长度 100 km 和拉曼放大的线路上传输超过 1 万公里, 系统的总容量可达 4.48 Tb/s。近年来光纤通信技术又有突破, 单信道速率已经超过 100 Gb/s, 达到 400 Gb/s 或 1 Tb/s。Bell 实验室在 2011 年美国光纤通信展览会 (OFC) 上报道了采用高阶的相位正交振幅调制 (QAM) 和相干检测方式实现了在 4 800 km 的大有效面积光纤中传输  $3 \times 485$  Gb/s 的信号, 频谱效率高达 4 b/s/Hz[10]。在单信道太比特传输方面, YiRan Ma 等人 2009 年首次报道了单信道 1 Tb/s 在普通单模光纤中传输 600 km 的技术, 其频谱效率为 3.3 b/s/Hz[11]。2011 年和 2012 年通过器件、算法和系统等方面的优化, 单信道太比特传输的距离得到大幅度的提高, 更贴近实用化水平。这些传输技术从 40G 到 100G, 再到 1 太比特的演进, 有的方案采用了近年来最新推出的超低损耗光纤、大有效面积光纤或色散管理线路等, 但也有很多超高速率、超大容量的传输方案依然采用了常规的 G.652 光纤。为更好对比各种传输方案, 我们将部分信息摘录于表 2 中。表 2 中的标准单模光纤 (SSMF) 表示无特殊性能指标优化的 G.652 光纤。

表 2 文献报道的光纤链路上的传输实验

容量	技术方法	光纤链路	完成单位
1 Tb/s	相干光正交频分复用 (CO-OFDM)	600 km SSMF	The University of Melbourne
400 Gb/s	光正交频分复用 (256QAM-OFDM)	400 km SSMF	Tohoku University
90 × 538 Gb/s	高阶相位正交振幅调制 (PDM-64QAM)	240.3 km 低损耗纯硅芯光纤	NTT Corporation
8 × 320 Gb/s	C-band WDM, 320G/信道	5 600 km 大有效面积光纤, $A_{eff}=120 \mu m^2$ , 0.185 dB/km	Alcatel-Lucent, Bell Labs
127 Gb/s	双偏振四相相移键控 (DP-QPSK)	4 800 km 色散管理链路。 第一段: 45 km, 19 ps/nm/km, 0.2 dB/km, $A_{eff}=90 \mu m^2$ ; 第二段: 28 km, 38 ps/nm/km, 0.245 dB/km, $A_{eff}=24.5 \mu m^2$	NEC Laboratories America, Inc
64 × 43 Gb/s	偏振复用归零码二进制相移键控 (PDM-RZ BPSK)	468 km 纯硅芯光纤, 0.163 dB/km, $A_{eff}=115 \mu m^2$	Alcatel-Lucent Bell Labs
8 × 80 Gb/s	PDM-OFDM-16QAM	4 200 km 环回实验, 两段光纤的组合链路。第一段: 30.3 km, 0.16 dB/km, $A_{eff}=146 \mu m^2$ ; 第二段: 30.3 km, 0.16 dB/km, $A_{eff}=112 \mu m^2$	NEC Laboratories America, Inc
100 Gb/s	PM-QPSK	1 500 km SSMF	AT&T Labs

CO-OFDM: 相干光正交频分复用  
 DP-QPSK: 双偏振四相相移键控  
 OFDM: 正交频分复用  
 OPGW: 光纤复合架空地线  
 PDM: 偏振复用  
 PDM-RZ BPSK: 偏振复用归零码二进制相移键控  
 QAM: 正交幅度调制  
 QPSK: 正交相移键控  
 SSMF: 标准单模光纤  
 WDM: 波分复用

通过分析全球光纤通信工程和传输实验的技术发展趋势，结合传输技术对光纤的要求，本文认为光纤技术发展的方向为：

(1) G.652.D 光纤在超高速率光纤传输网的建设中仍然将发挥重要作用，并且色散将不再是制约系统传输距离的主要因素。在大多数应用场景，G.652.D 光纤仍然具有良好的性能价格比。

(2) 低损耗的单模光纤和超低损耗的单模光纤，在需要长跨段的应用场景，有助于提高光纤链路的 OSNR。

(3) 大有效面积单模光纤，包括低损耗的大有效面积光纤，既降低了光纤的非线性效应，又提高链路的 OSNR，应用于海底光缆及超长距离无中继传输等特殊场合具有较好的技术实用性。但是 G.654 光纤存在与普通单模光纤的熔接兼容性差，截止波长偏大、拉曼增益小等问题。目前国际电信联盟（ITU-T）已经修订了 G.654 系列标准。

## 2 光纤技术的发展历程和中国光纤产业的技术突破方向

### 2.1 光纤技术的发展历程

从 1970 年世界上第一根光纤拉制出来，到光纤的衰耗降到 20 dB/km 的实用化水平，光纤技术的进步一直依赖于材料技术的突破和设备技术的进步。而 1998 年零水峰光纤概念的初次出现，为光纤制造厂商打开了二氧化硅光纤脱羟基的工艺路径，全世界光纤厂商通过对设备和工艺的改造实现了低水峰光纤的规模化生产。21 世纪初单模光纤的新技术标准将低水峰光纤列为 G.652.C 和 G.652.D 两个子类，并迅速地获得了光传输市场的认可。2002 年超低损耗概念光纤的实验室水平已接近石英光纤的极限（0.1484 dB/km）[12-19]，但是由于光纤工艺和设备的局限带来的成本上升，该光纤并没有获得市场的认可。EDFA 的普遍使用克服了光纤衰耗的问题，超低损耗光纤也没有列入光纤标准研究。在 2.5G 和 10G 建设过程中，由于色散和偏振模色散（PMD）对信号的损伤，光纤链路中必须进行色散补偿和 PMD 补偿。色散补偿光纤（DCF）的研发成功解决了线路色散的问题，而光纤拉丝过程中搓扭技术的实现使得光纤链路的 PMD 值大大改善。这些技术的发展使得 G.652.D 光纤大规模地应用在 10G 到 40G 的传输工程建设上。

### 2.2 超低损耗光纤技术仍有待突破

光纤技术发展的主线之一，是在光纤损耗、色散、偏振模色散、非线性系数等指标的不断完善、以及这些指标与光纤工作窗口、系统传输技术之间的平衡。近年来，新调制格式和相干检测方式极大地克服了光纤链路的色散导致的传输距离限制，这使得进一步降低光纤衰减和非线性系数又成为关注的重点。

光纤的损耗水平是与制造光纤的材料、工艺、设备技术紧密相关的。光纤在通信窗口的损耗主要来自材料的红外和紫外吸收拖尾、水峰吸收、散射损耗、弯曲损耗和缺陷带来的损耗。采用低水峰工艺制备的光纤，其损耗最大来源是散射损耗。通信光纤的散射损耗包括线性散射和非线性散射。非线性散射主要是受激拉曼散射和受激布里渊散射。而光纤中的线性

散射主要是瑞利散射。光纤中瑞利散射是由于光纤芯子中掺杂的二氧化锗的密度与浓度起伏所引起。而掺杂二氧化锗的主要目的是增大光纤芯子的折射率，形成单模光纤的波导。要进一步降低光纤的损耗，需要降低部分瑞利散射损耗，最佳的途径是采用单一材料的纯硅芯。而为了形成波导，必须在纯硅芯外沉积掺氟的包层，这对设备、工艺和波导设计等方面提出了很大挑战。在超低损耗光纤的制备上，由于该类光纤的材料结构与普通 G.652 光纤区别很大，需要通过掺氟工艺实现折射率降低的光学包层来满足光纤波导结构的需要。从材料的角度看，纯硅芯光纤由于二氧化硅芯层材料全部是玻璃网络形成体，未掺杂网络修饰体，使得玻璃网络的致密性与均匀性提高。因此纯硅芯光纤可以最大程度上克服掺杂引起的密度与浓度起伏，也就降低了瑞利散射损耗。但是，由于玻璃网络的致密性，导致其芯子羟基 (-OH) 脱除更困难，因此，纯硅芯光纤较难实现去除水峰，达到低水峰标准。纯硅芯光纤的另外一个弊端是工艺过程的复杂性和制备难度导致产能有限，光纤的制造成本会有所上升。图 2 给出了 G.652 和超低损耗光纤的折射率示意图。超低衰减光纤能否大规模应用还有待市场的检验。

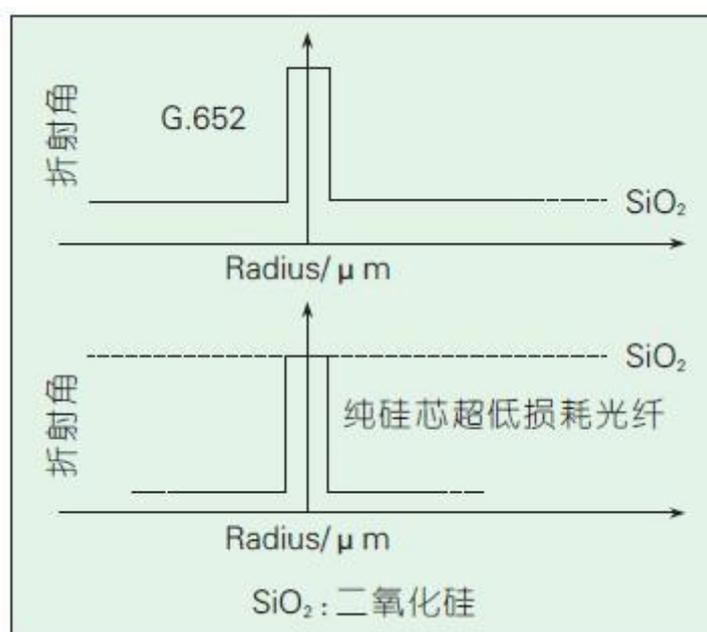


图 2 标准 G.652 光纤和纯硅芯超低损耗光纤的折射率示意图

### 2.3 提高光纤的有效面积是光纤研发的方向之一

大有效面积 (LEAF) 光纤在超高速率、超大容量传输系统中受到重视，是因为光纤有效面积的提高，可以使得光纤的非线性系数从常规单模光纤的  $1.26 \text{ w-1km-1}$  降到大有效面积光纤的大于等于  $1 \text{ w-1km-1}$ ，甚至减小到一半。非线性系数降低的优点是可以让注入光纤信号光最优功率的提高和光纤链路单跨段长度的增大。这样的配置可以减小网络建设的中继放大的需求，在特殊网络建设场合具有较大优势，例如海缆通信等。国际电信联盟已修订了截止波长位移单模光纤的 G.654 光纤标准，其主要特征是根据光纤在  $1550 \text{ nm}$  处的不同有效面积等指标划分了类别，以便更好地指导光纤制造与使用，详细情况请参见表 3。在海缆通信建设方面，为减少海底放大器数量，除了要求扩大光纤  $1550 \text{ nm}$  的模场外，还要求进一步降低光纤的损耗。该类光纤的波导结构设计要求更为复杂，如果同时要实现更低的光纤损耗，制造难度会增大。超低损耗大有效面积光纤的制造成本会有一些幅度的上升。

表 3 ITU-T G.654 标准的修订

光纤指标	模场直径 @1 550 nm	光缆截止 波长	光纤色散系数 @1 550 nm	光纤色散斜率 @1 550 nm	光纤衰减系 数@1 550 nm	光纤 PMD 系 数
G.654.B	9.5 ~ 13.0 m	≤ 1 530 nm	≤ 22 ps/nm · km	≤ 0.070 ps/ nm <sup>2</sup> · km	≤ 0.22 dB/ km	≤ 0.20 ps/√km
G.654.D 新	11.5 ~ 15.0 m	≤ 1 530 nm	≤ 22 ps/nm · km	≤ 0.070 ps/ nm <sup>2</sup> · km	≤ 0.19 dB/ km	≤ 0.20 ps/√km

大有效面积超低衰减光纤目前主要应用于海底光缆。据住友公司网站介绍，其纯硅芯大有效面积超低衰减光纤从 20 世纪 80 年代开始应用，到目前为止销售总量已超过 100 万公里。与每年上亿公里的 G.652.D 光纤相比，这仍然是一个细分的应用。与普通超低衰减光纤类似，大有效面积超低衰减光纤能否大规模应用于陆上大容量、超长距离传输，仍然取决于制造技术的突破和成本的降低，取决于整个传输系统的性价比能否得到大幅改善。

#### 2.4 多芯、少模光纤等新概念光纤是中长期研究方向

由于香农极限限制了单根光纤的传输容量(100 Tb/s),为了解决未来通信网扩容的压力,研究人员做了很多探索。这些探索研究包括少模光纤和多芯光纤等新型光纤以及采用这些新光纤做的传输实验。例如: Fatih Yaman 等人[20] 在 2010 年报道成功实现了总容量为  $10 \times 112$  Gb/s 信号在 5 032 km 的少模光纤中的传输实验。少模光纤的精确剖面设计,可使同一根光纤支持多个不同的模式复用传输,进一步扩大了通信复用的维度,提升了传输的带宽。少模光纤的优点是光纤设计理论完善、工艺技术成熟和制备技术可行。Jun Sakaguchi 等人在 2012 年 OFC 会议上报道了世界上最大容量的传输实验结果[21],在一根 10.1 km 的 19 芯光纤里面传输了 305 Tb/s 的信号,实现的频谱效率高达 30.5 b/s/Hz。多芯光纤被认为是最有希望在未来突破光纤香农极限的光传输网扩容技术。多芯光纤领域的研究集中在日本。日本光纤厂商和大学在光纤设计、制造、测试和传输实验方面的研究比较深入,同时打破了单根光纤传输容量的世界纪录。他们的研究开创了光纤通信扩容的一种技术路线。但是,多芯光纤的接续存在难度,缺乏媲美单模光纤熔接范式的低成本自动化解决方案。光放大、耦合等多方面的问题也有待一一解决。因此国际通信业界也有质疑的声音表示多芯光纤不如多根光纤在使用方面的简单、便捷。

这些新概念光纤在探索解决未来传输技术"瓶颈"方面做出了有益探索,但是研究还停留在实验室阶段,还没有研究工程化方面的课题,还需要光纤厂商、器件厂商、系统设备厂商等多方努力。

### 3 结束语

虽然多种光纤都可以实现超高速率、超大容量、超长距离的传输,但是光纤通信网的建设还是要根据实际需求出发,选择合适的光纤链路方案。从普适性方面看,G.652.D 光纤可适应从 40G 到 100G、甚至 1 Tb/s 的建设,且 G.652.D 具有成本优势。从对传输性能提升方面看,超低损耗和大有效面积光纤可应用于大跨段、超长距离通信网以及海底光缆的建设。但是目前超低损耗光纤技术突破难,供应少,成本高,应用还很少;对系统传输带来的益处也还有待在实际传输链路中进行更系统性的研究。多芯光纤和少模光纤从空分复用的维度将进一步提高光纤通信的容量,但是这一技术能否从实验室研究走向规模应用,还需等待光纤

通信行业从技术、需求和现实出发做大量的研究和探索。中国光纤厂商、器件厂商、系统设备制造商和运营商需要在未来的光纤通信技术研究上加强合作，突破关键技术，拥有自主知识产权，制订国家标准，形成全产业链良性互动与发展。

参考文献（略）

来源：中兴通讯技术 作者：成煜，杨晨，罗杰

收稿日期：2013-02-23