

光纤通信技术发展现状与展望

谈仲伟, 吕超

(香港理工大学电子及资讯工程学系, 香港 999077)

摘要: 作为激光技术的重要应用, 光纤通信技术是搭建现代通信网络的重要桥梁。随着物联网、大数据、云计算、虚拟现实和人工智能等新兴技术的涌现, 信息传递需求与日俱增, 这对光纤通信技术的发展提出了更高要求。本文在系统梳理光纤通信技术国内外发展现状的基础上, 分析了在具体场景应用中面临的问题与挑战, 研判了未来光纤通信技术发展的方向。经研究分析, 激光通信技术在超大容量光纤通信系统中面临的挑战可从发射功率增加、光放大器带宽增加、低传输损耗光纤以及空分复用相关技术研究等方面入手探讨解决思路; 同时结合现实应用情况, 本文对面向其他场景的光纤通信系统成本困境的解决进行了思考。总体而言, 光纤通信技术将朝着超大容量、智能化、集成化的方向不断演进, 未来期望可以实现智能化网络参数监测和超长距离、超大容量信息传输, 并且随着集成技术和光通信器件的不断进步, 必将推动整个光纤通信行业的高性能、低成本发展。

关键词: 光纤通信; 光网络; 超大容量; 集成; 智能化

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A

Optical Fiber Communication Technology: Present Status and Prospect

Tan Zhongwei, Lu Chao

(Department of Electronic and Information Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: As an important application of laser technology, optical fiber communications are key enablers for the current information age. With the emergence of new technologies including Internet of Things, big data, cloud computing, virtual reality, and artificial intelligence, there are growing needs in the society for high capacity information transmission, which puts forward higher requirements for the optical fiber communication technology. Based on a systematic review of the development status of the technology in China and abroad, this paper analyzes the problems and challenges it faces in the application of specific scenarios, and prospects the development of some related technologies in the future. Through analysis, the challenges in optical fiber communication systems with an ultra-large capacity can be solved by increasing the transmitted power, raising the bandwidth of optical amplifiers, and conducting research on low-loss optical fibers and technologies related to space division multiplexing. The cost problems of the systems in other scenarios are also considered. In general, the optical fiber communication technology is evolving toward the direction of ultra-large capacity, intelligence, and integration. It is hoped to realize intelligent monitoring of network parameters, as well as ultra-long distance and ultra-large capacity transmission. With the development of devices and integration technology, the optical fiber communication industry continues to move forward toward the goal of high performance and low cost.

Keywords: optical fiber communications; optical networks; ultra-large capacity; integration; intelligence

收稿日期: 2020-03-15; 修回日期: 2020-05-12

通讯作者: 吕超, 香港理工大学讲席教授, 美国光学学会会士, 研究方向为光纤通信与传感; E-mail: chao.lu@polyu.edu.hk

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国激光技术与信息应用 2035 发展战略研究”(2018-XZ-27)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

光纤通信技术自出现以来带来了科技和社会领域的重大变革。作为激光技术的重要应用,以光纤通信技术为主要代表的激光信息技术搭建了现代通信网络的框架,成为信息传递的重要组成部分。光纤通信技术是当前互联网世界的重要承载力量,同时也是信息时代的核心技术之一。众所周知,光纤通信技术的基本要素是光源、光纤和光电探测器(PD)。其中,应用最为广泛的光源是激光器;光纤的能量传输效率极佳,传输损耗是波导电磁传输系统中最小的;PD是光纤通信接收端的关键组成部分。

当前各类信息技术都需依靠通信网络来传递信息,光纤通信技术可以连接至各类通信网络,构成信息传输过程中的大动脉,并在信息传输中发挥重要作用。现代通信网络架构(见图1)主要包括:核心网、城域网、接入网、蜂窝网、局域网、数据中心网络与卫星网络等。不同网络之间的连接都可由光纤通信技术完成,如在移动蜂窝网中,基站连接到城域网、核心网的部分也都是由光纤通信构成的。而在数据中心网络中,光互连是当前最广泛应

用的一种方式,即采用光纤通信的方式实现数据中心内与数据中心间的信息传递。由此可见,光纤通信技术在现在的通信网络系统中不仅发挥着主干道的作用,还充当了诸多关键的支线道路的作用。可以说,由光纤通信技术构筑的光纤传送网是其他业务网络的基础承载网络。

随着各种新兴技术如物联网、大数据、虚拟现实、人工智能(AI)、第五代移动通信(5G)等技术的不断涌现,对信息交流与传递提出了更高的要求。据思科公司(Cisco)2019年发布的研究数据显示(见图2),全球年度IP流量将由2017年的1.5 ZB(1 ZB=10²¹ B)增长为2022年的4.8 ZB,复合年增长率为26% [1]。面对高流量的增长趋势,光纤通信作为通信网中最骨干的部分,承受着巨大的升级压力,高速、大容量的光纤通信系统及网络将是光纤技术的主流发展方向 [2]。

二、光纤通信技术的发展历程与研究现状

(一) 光纤通信技术的发展历程

随着1958年亚瑟·肖洛与查尔斯·汤斯揭示激光器工作原理之后,1960年第一台红宝石激光器研

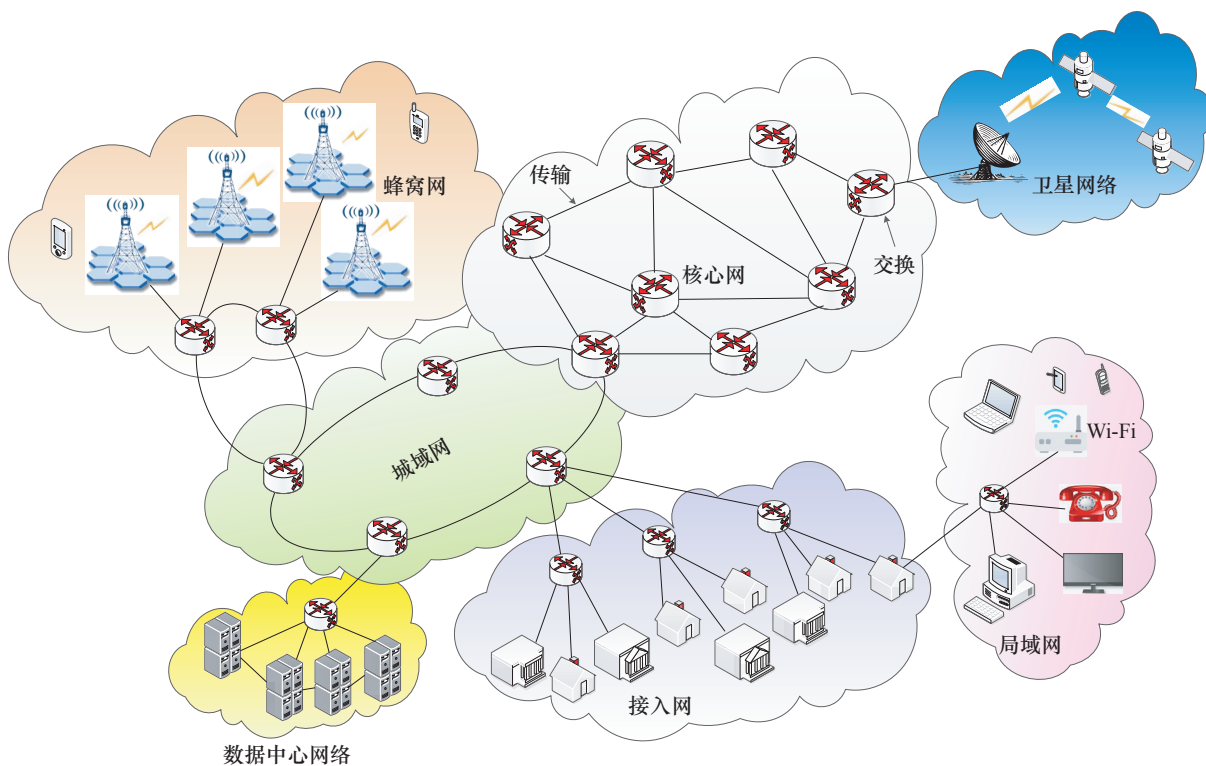


图1 现代通信网络架构

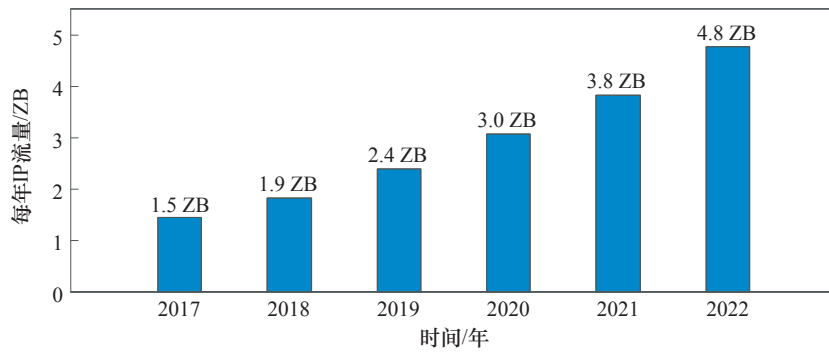


图 2 2017—2022 年全球年度网络 IP 流量走势 [1]

制成功。接着，1970 年第一个能在室温下连续工作的 AlGaAs 半导体激光器研制成功，并在 1977 年实现半导体激光器在实用环境中可连续工作几万小时以上。至此，激光器已具备应用于商用光纤通信的前提。在激光器发明之初，发明者已意识到其在通信领域的重要潜在应用。然而，激光通信技术存在两个明显的短板问题：一是因激光波束发散会损失大量能量；二是受应用环境的影响较大，如在大气环境下应用时会显著受制于天气情况的变化。因此，对激光通信而言，一个合适的光波导至关重要。

诺贝尔物理学奖获得者高锟博士提出的用于通信的光纤满足了激光通信技术对波导的需求。他提出，玻璃光纤的瑞利散射损耗可以非常低（低于 20 dB/km），而光纤中的功率损耗主要来源于玻璃材料中的杂质对光的吸收，因此材料提纯是减小光纤损耗的关键，此外还指出单模传输对保持好的通信性能很重要 [3]。1970 年，康宁玻璃公司根据高锟博士的提纯建议研制出了损耗约为 20 dB/km 的石英系多模光纤，使光纤作为通信的传输媒介成为现实。之后经过不断研发，石英系光纤的损耗在 1974 年达到了 1 dB/km，在 1979 年进一步达到了 0.2 dB/km，逼近了石英系光纤的理论损耗极限。至此，光纤通信的条件已完全满足。

早期的光纤通信系统均采用直接检测的接收方式（见图 3）。这是一种较简单的光纤通信方式，PD 是一种平方律的检波器，只有光信号的强度可以被探测到。换言之，这种通信方式只可以在光强度上加载信息来进行传输。此方式的接收灵敏度取决于数据传输速率，而传输距离是由数据传输速率与接收机跨导放大器（TIA）的热噪声共同决定的。这种直接检测的接收方式从 20 世纪 70 年代的第一代光纤通信技术一直延续到了 20 世纪 90 年代

初期，而对应具体的技术指标也由工作在 0.8 μm 的 GaAs 半导体激光器发射 45 Mbit/s 信号无中继传输 10 km，提升至工作在 1.5 μm 的半导体激光器发射 2.5 Gbit/s 信号无中继传输 100 km。

进入 20 世纪 90 年代以来，光纤通信技术中的相干检测技术逐渐成为研究热点 [4]。初期的相干检测的示意图如图 4 所示，这也是第一代的相干检测系统。通过使用相干检测，可实现最优探测灵敏度（受限于散弹噪声极限），另外，这也可以通过使用一个大功率的本振来实现。在直接检测探测系统中，只可以探测到信号光的功率 P_s ，而相干检测探测系统中可以探测到的信号大小为 $2\sqrt{P_s P_{LO}}$ ，其中 P_{LO} 是本振光的功率，只要本振光功率足够大就可以达到探测灵敏度的极限。总之，通过引入相干检测技术，接收机的灵敏度得到了极大提升。在早期的相干检测中主要采用外差（Heterodyne）探测和零差（Homodyne）探测，其中外差检测指信号载波与本地载波的频率差值为中频，而零差探测指信号载波与本地载波频率完全相同、相位差固定。

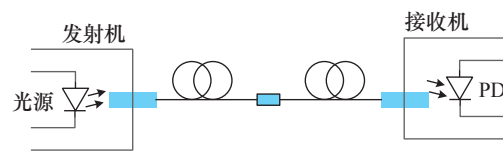


图 3 直接检测光纤通信系统示意图

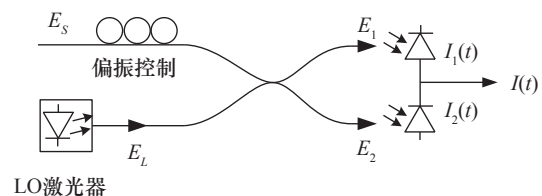


图 4 相干检测示意图

为了保证锁频以及恢复接收信号的载波相位，早期的相干检测技术需要复杂的光学锁相环。此外还需要通过偏振控制器（PC）来使得信号光与本振光的偏振态保持一致，以便达到最大效率的接收。

光放大器也是光纤通信技术史上重要的成果之一。采用光放大器的光纤链路，也可以达到散弹噪声极限的探测灵敏度，同时可以去除所有的电中继，使得光纤通信技术可以实现长距离传输。光放大的概念在最早的激光器专利中就有所建议，最终在 1987 年，该项技术被南安普顿大学和贝尔实验室首次实现 [5,6]。

（二）光纤通信技术的研究现状

自 20 世纪 90 年代以来，随着互联网技术的迅速发展，用户对互联网流量的需求日益增长，并随之带来了光纤通信容量的迫切增长需求。起初，当 2.5 Gbit/s 的光纤通信技术问世后，人们普遍认为其可以支撑好几代互联网的发展，但光纤通信容量的增长需求很快打破了这一现状。

如何提升光纤通信的容量成为亟需解决的问题。“信息论之父”香农给出了信道容量的极限，任何通信系统传输信息的容量都不会超过这个极限，它与系统的带宽与信道中的信噪比相关。当系统带宽越大、信噪比越高，系统的容量极限就会越高。根据香农的理论，单根光纤纤芯中的容量极限可以表示为：

$$C = 2B \log_2(1 + S/N) \quad (1)$$

式（1）中，2 为两个正交偏振态复用； B 为带宽，光纤的带宽取决于光放大器能够提供的带宽，而 C+L 波段一共约 95 nm； S 为入纤功率，受限于光

纤的非线性； N 为噪声功率，决定于放大器的噪声系数、光纤损耗、跨段长度和跨段数。

典型的 C 波段掺铒光纤放大器（EDFA）的带宽为 35 nm，即约 4375 GHz。面对如此巨大的带宽资源，如何充分利用它来实现大容量的光纤传输是关键。由此我们想到了波分复用（WDM）。波分复用是使不同波长的载波同时承载信号，共同在一根光纤中传输，由于各载波的波长不同，故可轻易分别解调出来。此外，光纤布拉格光栅（FBG）的发明也方便了波分复用，它可以用于密集波分复用（DWDM）的滤波器、增加/减少多路复用器、EDFA 增益均衡器 [7,8]。图 5 为 WDM 光纤通信系统示意图。

从另一个角度看香农公式，可以表示为：

$$C/B = 2 \log_2(1 + S/N) \quad (2)$$

式（2）中， C/B 表示频谱效率，单位为 bit/s/Hz，而 S/N 表示信号的电信噪比。例如，当电信噪比为 10 dB 时，系统所能达到的极限频谱效率为 6.9 bit/s/Hz。由于系统的带宽受限于 EDFA，光纤通信目前只能获得有限的带宽，故可以通过提高频谱效率的方式来增加信道容量。增加带宽 B 内的利用率可从两个方向来展开。一是采用 DWDM、高阶调制格式、奈奎斯特（Nyquist）整形、超级信道（super channel）、超奈奎斯特传输（FTN）、前向纠错（FEC）、概率整形等技术来逼近香农极限，但频谱效率的增加将对电信噪比的要求有所提升，从而减少了传输的距离。二是充分利用相位、偏振态的信息承载能力来进行传输，这也就是第二代相干光通信系统，接收机如图 6 所示 [4]。偏振复用（PDM）已普遍采用，用两个正交的偏振态来分别承载信息以使信道容量翻倍。第二代相干光通信系统采用光混频器进行内

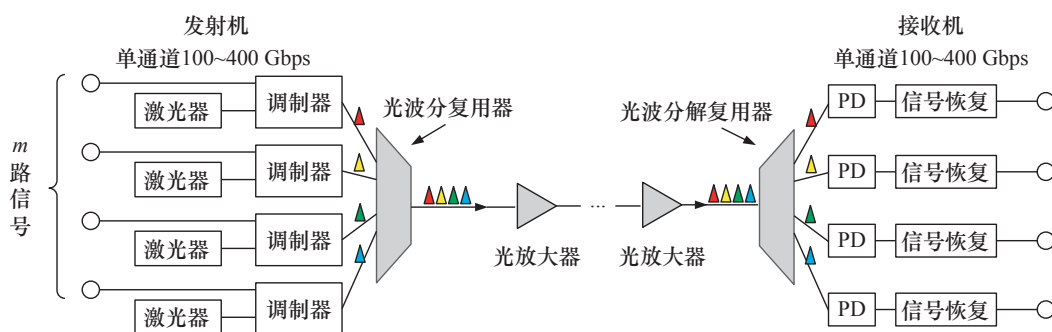


图 5 WDM 光纤通信系统示意图

差 (Intra-dyne) 检测, 并采用偏振分集接收, 即在接收端将信号光与本振光分解为偏振态互为正交的两束光, 在这两个偏振方向上分别拍频, 这样可以实现偏振不敏感接收。另外, 需要指出的是, 此时接收端的频率跟踪、载波相位恢复、均衡、同步、偏振跟踪和解复用均可以通过数字信号处理 (DSP) 技术来完成, 这极大简化了接收机的硬件设计, 并提升了信号恢复能力 [9,10]。

目前, 上述技术产品在商业领域中的应用现状为中国电信集团有限公司和華為技术有限公司已实现了 50 G 波道间隔、单路 200 Gbit/s 的偏振复用 16 QAM 信号, 通过概率星座图整形和奈奎斯特整形实现了 1142 km 传输 (实验室可实现 1920 km 传输), 单纤总容量为 16 Tbit/s。而最新的研究成果有: 贝尔实验室等利用半导体光放大器 (SOA) 和拉曼放大实现了 107 Tbit/s、103 nm (1515~1618 nm) 波段范围的 300 km 传输 [11]; 華為技术有限公司利用 C+L 波段的 EDFA 实现了 124 Tb/s 信号在 600 km 的传输。

三、光纤通信技术发展面临的挑战与思考

(一) 超大容量光纤通信系统

通过各种技术的运用, 目前学界和业界已基本达到光纤通信系统频谱效率的极限, 如要继续增大传输容量, 只能通过增加系统带宽 B (线性增加容量) 或增加信噪比 (SNR) (增加功率, 对数增加容量) 来实现, 具体探讨如下。

1. 增加发射功率的解决方案

由于适当增加光纤截面的有效面积可以降低高功率传输带来的非线性效应 [12], 因此采用少模光

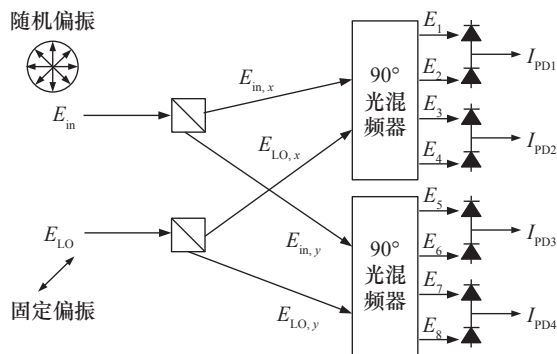


图6 第二代相干检测示意图

纤代替单模光纤进行传输是一种增加功率的解决方案。此外, 当前最通用的解决非线性效应的方案是采用数字背向传输 (DBP) 算法, 但算法性能的提升会导致运算复杂度的增加。原始的 DBP 算法仅能应对一个通带内的非线性效应, 带间的交叉相位调制 (XPM) 等非线性效应无法得到补偿; 而多通带 DBP 算法可以用来补偿通带间的非线性效应, 如 XPM 和四波混频 (FWM), 但复杂度会显著增高。近期, 机器学习技术在非线性补偿方面的研究显现出了很好的应用前景, 极大地降低了算法的复杂度, 因此今后可通过机器学习来辅助 DBP 系统的设计。

2. 增加光放大器的带宽

增加带宽可以突破 EDFA 的频带范围的限制, 除了 C 波段与 L 波段以外, 可将 S 波段也纳入应用范围, 采用 SOA 或拉曼放大器进行放大 [11]。而现有光纤在 S 波段之外的频段损耗都较大, 如 O 波段 1310 nm 附近光纤的损耗就达到了 0.3 dB/km, 需设计新型光纤来降低传输损耗。但对其余波段而言, 有商业利用价值的光放大技术也是一个挑战。这些光放大技术与 EDFA 相比, 存在增益较小、噪声系数较大的问题, 如掺镨的 O 波段光纤放大器 (1280~1320 nm) 的增益为 10~25 dB、噪声系数为 7 dB; 掺铥的 S 波段光纤放大器 (1477~1507 nm) 的增益为 22 dB、噪声系数为 6 dB; 而 SOA 具有类似的噪声系数, 且存在对 WDM 系统的交叉增益调制问题。

3. 低传输损耗光纤的研究

研究低传输损耗光纤是该领域最关键的问题之一。空芯光纤 (HCF) 具有更低传输损耗的可能, 将减少光纤传输的时延, 可在极大程度上消除光纤的非线性问题。一项最新研究结果显示, HCF 的一种嵌套反谐振无节点光纤 (NANF) 可实现在 1510~1600 nm 波段 0.28 dB/km 的传输损耗 [13], 且理论预测表明该结构具有继续降低损耗至 0.1 dB/km 的可能 [14], 这将低于石英光纤的材料损耗极限 (瑞利散射极限 0.145 dB/km)。另外, NANF 还具有更宽阔的低损耗窗口的可能, 目前已知报道的带宽已达到 700 nm [15]。

4. 空分复用相关技术的研究

空分复用技术是实现单纤容量增大的有效方案 [16], 具体有: 采用多芯光纤进行传输, 成倍增加单纤的容量, 在这方面最核心的问题是有无更高

效率的光放大器，否则只能等价于多根单芯光纤；采用包括线偏振模式（LP mode）、基于相位奇点的轨道角动量（OAM）光束和基于偏振奇点的柱矢量光束（CVB）等的模分复用技术，这类技术可为光束复用提供新的自由度，提高光通信系统的容量，在光纤通信技术中具有广阔的应用前景，但相关光放大器的研究同样是挑战。另外，如何平衡差分模群时延（DMGD）以及多输入多输出（MIMO）数字均衡技术等带来的系统复杂度也值得关注。未来，希望空分复用相关的技术研发可以形成与 WDM 系统类似的演进路线以推动光纤技术的发展。

（二）各类其他场景下的光纤通信系统

超大容量光纤通信系统是主要应用于骨干网络场景下的光纤通信系统，并不考虑成本问题。而当前光纤通信技术已应用于多种不同场景，大多存在对成本敏感的现实困境。为此，本文将列举出当前若干个成本敏感的场景与系统，并简要分析它们的发展前景。

1. 不同调制检测组合场景下的光纤通信系统

光纤通信技术因调制和检测方式的不同，其应用成本也会有很大差异。当前，在一些成本非常敏感的场景中仍使用最早的光通信方式，即强度调制-直接检测（IMDD）；但在对通信性能要求严苛的环境中，采用的是最复杂的传统相干通信方式。未来在这两种通信方式之间可以有很多过渡方案，亟需在性能与成本上进行平衡，找到适合具体场景使用的方案，具体有：采用正交（IQ）调制、直接检测的系统，如常见的单边带（SSB）调制、直接检测的系统 [17]；采用强度调制、相干检测的通信方式，利用直接调制激光器（DML）的啁啾对信号相位产生一定的调制，最终再由相干接收机检测出对应的信息 [18]。

几类特殊的光纤通信系统，如基于斯托克斯矢量直接检测（SVDD）接收机的系统 [19]，基于克莱默-克朗尼格（KK）关系接收机的系统 [20]，以及最近新提出的载波辅助差分检测（CADD）接收机的系统 [21]。SVDD 系统是通过斯托克斯矢量的方式接收信号，接收机比传统相干系统简单，但最终接收信号只能接收到一个偏振态的信息，无法实现完全的偏振复用，亟需研发出基于 SVDD 接收机的硅光集成芯片，以进行推广应用。而 KK 系

统是根据特殊信号（一般是单边带信号）所具有的 KK 关系，通过接收的信号幅度推算出相位，在直接检测的系统中实现相干检测的效果，但该系统的频谱效率仅有传统相干检测系统的一半。而 CADD 系统采用特殊的接收机实现了与相干检测相比接近 100% 的频谱利用率，但此系统目前只有单偏振态的结果，暂时无法得到偏振复用的结果。希望未来可以研究出类似于传统相干方式的偏振复用、100% 频谱利用率的简化相干通信方式。值得注意的是，以上这些系统虽各有利弊，但随着器件与集成技术不断地发展，在不同的应用场景下，如何结合成本作出公平公正的对比是一个关键问题。

2. 不同传输距离场景下的光纤通信系统

如果以传输距离与应用场景来划分，可以将光纤通信技术划分为不同的种类，其中典型的短距离光传输系统包括数据中心光互连与接入网系统的光传输链路。目前多数短距离光传输采用 IMDD 的通信方式，随着传输距离的增加，通信方式逐渐向相干通信靠拢。数据中心内的光互连主要采用基于垂直腔面发射激光器（VCSEL）和多模光纤链路为主的 IMDD 系统 [22]，数据中心间的光互连部分采用 IMDD 的通信方式，部分将有望采用直接检测与相干检测过渡方案或简化相干检测方案 [23]。而中长距传输系统包括应用于城域网的链路，目前都在逐步向相干系统演进。长距离传输系统包括：核心网传输链路和跨洋传输，这些属于对传输性能要求较高且成本不敏感的系统。

四、光纤通信技术发展展望

光纤通信技术从最初的低速传输发展到现在的高速传输，已成为支撑信息社会的骨干技术之一，并形成了一个庞大的学科与社会领域。今后随着社会对信息传递需求的不断增加，光纤通信系统及网络技术将向超大容量、智能化、集成化的方向演进，在提升传输性能的同时不断降低成本，为服务民生、助力国家构建信息社会发挥重要作用。

（一）智能化光网络

与无线通信系统相比，智能化光网络的光通信系统及网络在网络配置、网络维护及故障诊断方面仍处于初级阶段，智能化程度不足。由于单根光纤

容量巨大（可能大于 100 Tbit/s），任一光纤故障的发生将给经济、社会带来很大影响，因此网络参数的监测对未来智能网络的发展至关重要。今后这方面需关注的研究方向有：基于简化相干技术与机器学习的系统参数监测系统、基于相干信号分析和相位敏感光时域反射（OTDR）的物理量监测技术。

（二）集成技术与系统

器件集成的核心目的是降低成本。在光纤通信技术中，通过不断的信号再生可以实现信号的短距离高速传输。但是由于相位和偏振态恢复的问题，目前相干系统的集成还较困难。另外，如果大规模集成的光-电-光（OEO）系统可以实现，也会显著提升系统容量。但是限于技术效率低、复杂度高、难以集成等因素，光通信领域不太可能广泛推广如全光 2R（再放大、再整形）、3R（再放大、再定时、再整形）等全光信号处理技术。因此，在集成技术与系统方面，今后研究的方向有：对空分复用系统的现有研究虽已较丰富，但学界、业界对空分复用系统关键器件尚未实现技术突破，需进一步加强研究，如集成激光器与调制器、二维的集成接收机、高效率的集成光放大器等；新型光纤可能会显著拓展系统带宽，但仍需深入研究以确保其综合性能与制造工艺能达到现有单模光纤的水平；研究通信链路中可与新型光纤搭配使用的各类器件。

（三）光通信器件

在光通信器件中，硅光器件的研发已初见成效。但目前国内相关研究多以无源器件为主，对有源器件的研究较为薄弱。在光通信器件方面，今后的研究方向有：有源器件与硅光器件的集成研究；非硅光器件集成技术的研究，如 III-V 族材料衬底集成技术的研究；新型器件研发的进一步跟进，如兼具高速与低功耗优点的集成铌酸锂光波导 [24]。

致谢

感谢国家重点研发计划（2018YFB1801701）、国家自然科学基金（U1701661）、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金（2019GZKF1）对本研究的资助。

参考文献

[1] Cisco. Cisco visual networking index: Forecast and trends, 2017—2022 [R/OL]. (2019-02-27) [2019-06-12]. <https://cyrexdigital.com/pl/blog/content-marketing-trendy-na-rok-2019/white-paper-c11-741490.pdf>.

[2] Winzer P J, Neilson D T. From scaling disparities to integrated parallelism: A decathlon for a decade [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(5): 1099–1115.

[3] Kao K C, Hockham G A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies [J]. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1966, 113(7): 1151–1158.

[4] Kikuchi K. Fundamentals of coherent optical fiber communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 34(1): 157–179.

[5] Mears R J, Reekie L, Jauncey I M, et al. Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μm [J]. *Electronics Letters*, 1987, 23(19): 1026–1028.

[6] Desurvire E, Simpson J R, Becker P C. High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(11): 888–890.

[7] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication [J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647–649.

[8] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(15): 823–825.

[9] Savory S J. Digital coherent optical receivers: Algorithms and subsystems [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2010, 16(5): 1164–1179.

[10] Lau A P T, Gao Y, Sui Q, et al. Advanced DSP techniques enabling high spectral efficiency and flexible transmissions: Toward elastic optical networks [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(2): 82–92.

[11] Renaudier J, Arnould A, Le Gac D, et al. 107 Tb/s transmission of 103-nm bandwidth over 3×100 km SSMF using ultra-wideband hybrid Raman/SOA repeaters [C]. San Diego: Optical Fiber Communication Conference 2019, 2019.

[12] Sui Q, Zhang H Y, Downie J D, et al. 256 Gb/s PM-16-QAM quasi-single-mode transmission over 2600 km using few-mode fiber with multi-path interference compensation [C]. San Diego: Optical Fiber Communication Conference 2014, 2014.

[13] Jasion G T, Bradley T D, Harrington K, et al. Hollow core NANF with 0.28 dB/km attenuation in the C and L bands [C]. San Diego: Optical Fiber Communication Conference 2020, 2020.

[14] Gao S, Wang Y, Ding W, et al. Hollow-core conjoined-tube negative-curvature fibre with ultralow loss [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1–6.

[15] Sakr H, Bradley T D, Hong Y, et al. Ultrawide bandwidth hollow core fiber for interband short reach data transmission [C]. San Diego: Optical Fiber Communication Conference 2019, 2019.

[16] Winzer P J, Neilson D T, Chraplyvy A R. Fiber-optic transmission and networking: The previous 20 and the next 20 years [J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 24190–24239.

[17] Zhu Y, Zou K, Zhang F. C-band 112 Gb/s Nyquist single sideband direct detection transmission over 960 km SSMF [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(8): 651–654.

[18] Che D, Yuan F, Hu Q, et al. Frequency chirp supported complex modulation of directly modulated lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(8): 1831–1836.

[19] Che D, Li A, Chen X, et al. Stokes vector direct detection for

- short-reach optical communication [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3110–3113.
- [20] Mecozzi A, Antonelli C, Shtaif M. Kramers–Kronig coherent receiver [J]. *Optica*, 2016, 3(11): 1220–1227.
- [21] Shieh W, Sun C, Ji H. Carrier-assisted differential detection [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 1–9.
- [22] Tan Z, Yang C, Zhu Y, et al. High speed band-limited 850-nm VCSEL link based on time-domain interference elimination [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(9): 751–754.
- [23] Zhong K, Zhou X, Huo J, et al. Digital signal processing for short-reach optical communications: A review of current technologies and future trends [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(2): 377–400.
- [24] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages [J]. *Nature*, 2018, 562(7725): 101–104.