



超高速超大容量超长距离光传输基础理论与关键技术研究^{*}

余少华^{1,2}, 杨 奇^{1,2}, 薛道均^{1,2}, 贺志学^{1,2}, 黎 偲^{1,2}

(1. 武汉邮电科学研究院 武汉 430074; 2. 光纤通信技术和网络国家重点实验室 武汉 430074)

摘 要:超高速超大容量超长距离(3U)光传输作为一种新型光通信模式,推动了下一代互联网和宽带移动通信网的发展和技术进步,已成为国际高科技知识产权竞争的焦点和制高点。从3U光传输研究的背景与意义出发,给出了3U光传输的3个科学问题,并介绍了3U光传输的体系架构、研究的基础理论与关键技术,最后介绍了3U光传输的实验验证平台和在该平台上完成的重要实验以及产学研结合创新成果的产业化应用范例。

关键词:超高速;超大容量;超长距离;光传输;多波长光源;高谱效率;光编码;光调制;光参量放大;非线性抑制;色散管理

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.10.010

Research on Basic Theory and Key Technology of Ultra-High-Speed, Ultra-Large-Capacity, Ultra-Long-Haul Optical Transmission

Yu Shaohua^{1,2}, Yang Qi^{1,2}, Xue Daojun^{1,2}, He Zhixue^{1,2}, Li Cai^{1,2}

(1. Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074, China;

2. State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan 430074, China)

Abstract: Ultra-high-speed, ultra-large-capacity and ultra-long-haul (3U) optical transmission as a new mode of communication can greatly promote the next generation of optical internet and broadband mobile communication network development and technological progress, therefore 3U has become the focus of international high-tech intellectual property and competition ground. Starting from the background and significance of 3U research, the three scientific problems in 3U were given, and the architecture, basic theory and key technology of 3U optical transmission were introduced. Finally, the verification platform was introduced together with the important experiments completed on the platform, as well as the industrial application of the innovative achievements.

Key words: ultra-high-speed, ultra-large-capacity, ultra-long-haul, optical transmission, multi-wavelength source, high spectral efficiency, optical coding, optical modulation, optical parametric amplification, nonlinear suppression, dispersion management

1 引言

自1960年第一台红宝石激光器问世后,人们便与光通信结下了不解之缘。1966年,英籍华人高锟博士提出利用光纤实现长距离传输光波的设想,在世界各国掀起了一

个研究光纤通信的热潮。1976年,美国在亚特兰大进行了世界上第一个实用光纤通信系统的现场试验,系统采用GaAlAs激光器作光源,多模光纤作传输介质,速率为44.7 Mbit/s,传输距离为10 km。此后,光纤通信系统开始飞速发展:1980年,美国标准化FT-3光纤通信系统投入商

^{*} 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2010CB328300)

用;1988 年,由美、日、英、法发起的第一条横跨大西洋 TAT-8 海底光缆通信系统建成,海底通信系统得到全面展开;1989 年,掺铒光纤放大器(EDFA)的问世,为光纤通信系统打开了新的局面,光波分复用(WDM)得到了广泛的应用。

人类对信息需求的急剧增加,促进了信息科学的不断进步。光通信传输作为信息时代的基础传输建设,正不断地向前发展。光波具有极高的频率(大约 3 亿兆赫兹),也就是说具有极高的带宽来容纳巨大的通信信息,所以用光波作为载体进行高速光纤通信一直是信息科学所追求的目标。光纤通信的速率不断增加、容量不断扩大、距离不断加长。从美国贝尔实验室在亚特兰大到华盛顿之间建立世界第一条实用化的 45 Mbit/s 光纤通信线路开始,光纤通信系统的速率不断提高,20 世纪末到 21 世纪初,光纤传输从单波长的 2.5 Gbit/s 和 10 Gbit/s 爆炸性地发展到多波长的 Tbit/s 级传输,极大地促进了信息科学的进步和信息产业的发展。

当前,光通信网络正朝着规模不断扩展、容量快速增长、业务日益丰富、应用愈加灵活、需求日趋多样的方向快速发展,寻求新型的超高速、超大容量、超长距离(ultra-high-speed, ultra-large-capacity, ultra-long-haul, 3U)光传输机理与模式已成为未来光通信技术领域面临的重大挑战。3U 光传输作为一种新型光通信模式推动下一代互联网和宽带移动通信网的发展和技术进步,已成为国际高科技知识产权竞争的焦点和制高点。我国光通信制造能力与光网络应用规模在国际上已处于前列,但在原创性核心技术及知识产权方面明显落后于发达国家,极大地制约了我国在 21 世纪信息产业的可持续发展。发展新型的 3U 光传输,对推动信息产业服务于国民经济,促进我国步入信息化先

进国家和确立国际战略优势地位具有重大意义。

3U 光传输的研究围绕如下 3 个重大的科学问题展开。

- 高谱效率的途径、机理与容量限问题。在香农理论的基础上建立适应光纤传输信道和发射接收系统的准线性近似、非线性预补偿和相干接收的完整模型,拓展香农理论在光信息领域的应用,解决高速光通信系统与香农定理的偏离问题,为未来光通信系统容量确立新的规则,具有重大的理论和实用意义。并且在该模型的基础上,探讨提高 3U 频谱效率的途径及其机制,以期较大程度地提高现有通信系统的频谱利用率,使之接近香农极限,最大限度地提升 3U 系统容量服务。
- 复杂光纤色散与多阶均衡问题。利用复杂色散模型和信息处理算法实现对色散的检测。高精度色散管理分为静态可调和动态可调两部分,分别应用于光纤传输线路和接收端,具有不同的色散要求。独立的色散及色散斜率调整能够对所有光通道进行多阶精确色散控制和均衡。构成了光纤色散的基础理论框架,解决了高阶色散补偿问题,实现由一阶色散补偿向多阶色散均衡的飞跃。
- 光纤非线性动态协同适变性问题。重点研究和揭示多种非线性效应相互作用的机理及规律;结合全光通道统一归零码光源的特性,消除了非线性的统计变化,利用精确的数据比特光程差控制,提出了一个全新的非线性抑制和管理的机理和方法;研究 3U 系统下的色散和非线性动态协同的适变性;实现 3U 全波段光纤通道准线性传输模型的建立和其理论的突破。

首席科学家

余少华

男;武汉邮电科学研究院总工程师、教授级高级工程师、博士生导师,光纤通信技术和网络国家重点实验室主任,国家重点基础研究发展计划(“973”计划)首席科学家,国家高技术研究发展计划(“863”计划)网络与通信主题专家,中国通信学会会士,中国通信学会光通信委员会主任,曾任国际电信联盟“光网络和其他传送网络”研究组副主席。长期从事通信网络和光纤通信技术研究,负责并完成了“973”计划、“863”计划、下一代互联网等 10 多项国家重要项目,先后发表论文 40 多篇,著作 2 部,申请发明专利 58 件,其中已授权 42 件,作为唯一发明人授权中国发明专利 20 件和美国专利 7 件,这些专利均已得到实施应用并取得重要的社会 and 经济效益。是 3 项全国信息产业重大技术发明的发明人,先后获得国家技术发明奖二等奖 2 项(均排第 1 位),国家科学技术进步奖二等奖 2 项(排第 1 位和排第 3 位),中国发明专利金奖(单一发明人)。



在不断飞速发展的信息科学领域,研究 3U 光传输,总体上将实现 3U 光传输理论的突破与创新,使我国在相关领域的研究成果和技术创新进入国际领先行列,为促进我国信息产业可持续发展提供科学理论和核心技术支持。实现基础理论上有所突破,关键技术上有创新,重大应用上有贡献,为我国信息科学的不断发展建立长远的战略优势。

2 科学问题

3U 光传输的理论研究聚焦于光纤通信领域的 3 个科学问题:高谱效率的途径、机理与容量限问题;复杂光纤色散与多阶均衡问题;光纤非线性动态协同适变性问题。这 3 个科学问题一直是制约光纤通信发展的核心问题。

2.1 高谱效率的途径、机理与容量限问题

信息论及数字通信时代的奠基人克劳德·香农在 1948 年率先提出了通信信道能够传输的信息容量问题。一般用香农理论来分析光纤信道都做了很大近似,需要假设信道具有较弱的非线性效应、低色散和传输速率限制。由于这些研究中没有考虑调制方式、象限阶数和非线性补偿问题,使得该理论模型具有较大缺陷。因此如何基于香农理论建立先进光通信系统的完整模型(用于研究高频谱利用率、多极性振幅和相位调制、高速准线性传输、发射机预失真反向补偿非线性效应和相干接收等前沿技术),是亟需解决的关键科学理论问题之一。

此外,要达到接近香农极限的信号传输效率,需要超强的编码。奈奎斯特(Nyquist)定理描述了信号数据率与带宽之间的关系,当数据信号为二进制时,每赫兹带宽的理想低通信道的最高码元传输速率是每秒 2 个码元;当数据

信号为 M 进制时,奈奎斯特定理决定的信道容量为 $C=2 B \lg M$,因此提高数据进制可以提高系统的容量。复杂的线路编码既可以增加信道容量,也可以用于信道纠错,但是线路编码也增加了接收机判决的复杂度。因此如何在多电平编码情况下实现接收机多电平软判决也是本问题需要研究的重要内容。

在香农理论的基础上建立适应光纤传输信道和发射接收系统的准线性近似、非线性预补偿和相干接收的完整模型。该理论模型的建立,将拓展香农理论在光信息领域的应用,解决高速光通信系统与香农定理的偏离问题,为未来光通信系统容量确立新的规则,具有重大的理论和实用意义。并且在该模型的基础上,探讨提高 3U 频谱效率的途径及其机制,以期较大程度地提高现有通信系统的频谱利用率,使之接近香农极限,最大限度地提升 3U 系统容量服务。

2.2 复杂光纤色散与多阶均衡问题

研究复杂的光纤色散机理及多阶色散均衡问题对超高速光通信传输系统具有十分重大的意义,它能够优化先进调制格式,降低对超高速 DSP 的要求,简化超高速光信号的接收和处理,全面控制或消除光纤系统的色散影响,使光接收机能够直接在低速光电通道接收处理信号,充分利用现有成熟技术实现高频谱效率。超高速光传输系统的色散管理具有其独特的要求,需要对光纤色散的复杂变化进行深入研究,对色散的多种变化建立模型,并能够以此为基础建立有效的超高精度全波段的多阶补偿机制。

本科学问题涵盖超高精度色散管理的两个核心部分。

- 高精度色散在线精确测量:利用复杂色散模型和信息处理算法能够实现对色散的检测。

项目简介

信息传输是《国家中长期科学与技术发展规划纲要》重点领域及其优先主题中的内容。超高速超大容量超长距离光传输是国际通信学术界竞争的焦点和制高点。我国在原创技术及知识产权方面明显落后于发达国家,极大地制约了我国信息产业的可持续发展。

“973”计划“超高速超大容量超长距离光传输基础研究”项目主要针对信息领域中“研究适合于长途干线超高速光传输的具有高谱效率的新型光调制/解调方式、非线性效应的抑制方法和色散管理机制”的内容开展研究,凝练出超高速(ultra-high-speed)、超大容量(ultra-large-capacity)、超长距离(ultra-long-haul)(简称“3U”)光纤传输的 3 个科学问题:高谱效率的途径、机理与容量限问题;复杂光纤色散与多阶均衡问题;光纤非线性动态协同适变性问题。

“973”计划“超高速超大容量超长距离光传输基础研究”项目从以下几个方面展开研究。

- 针对复杂的光纤色散制约 3U 传输速率和距离的问题,提出 3U 光传输复杂光纤色散与多阶均衡理论,实现 3U 全波段、精确色散管理基础理论和方法的突破。

- 色散及色散斜率独立可调:高精度色散管理分为静态可调 and 动态可调两部分,分别应用于光纤传输线路和接收端,具有不同的色散要求。独立的色散及色散斜率调整能够对所有光通道进行多阶精确色散控制和均衡。

这两个核心内容结合在一起,构成了光纤色散的基础理论框架,解决了高阶色散补偿问题,形成由一阶色散补偿向多阶色散均衡的飞跃。

2.3 光纤非线性动态协同适变性问题

色散和非线性动态协同的适变性是 3U 光纤通信系统的核心问题之一。和单纤速率为 10 Gbit/s 和 40 Gbit/s 的传统光通信系统相比,3U 系统的数据信息带宽较宽,非线性作用的影响性质不同,不同调制格式的频谱也不同,使得光传输的非线性影响是前者的数十倍。

对光传输有重要作用的非线性效应有:受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)、自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)等。其中 SPM、XPM、FWM 源于同一个非线性机制(Kerr 效应),具有响应带宽远大于 DWDM 系统所有波长总带宽、能和光纤色散相互作用的复杂特性,成为影响光系统传输的主要非线性来源。超高速光传输系统的非线性具有带内、带外多种非线性因素的复杂相互作用的特征。

在传统光传输中,非线性效应是以统计形式表现出来的,光通道内部不同数据码串有不同的非线性统计变化。源于通道之间相互作用的非线性呈现类白噪声的统计特征,变化十分复杂,目前没有很有效的抑制方法。

以高精度色散管理技术为基础,重点研究和揭示多种

非线性效应相互作用的机理及规律;结合全光通道统一归零码光源的特性,消除了非线性的统计变化,利用精确的数据比特光程差控制,提出了一个全新的非线性抑制和管理的机理和方法;研究 3U 系统下的色散和非线性动态协同的适变性;实现 3U 全波段光纤通道准线性传输。这种方法能够对每个光比特信号的相对时间位置进行精确管理,还能充分利用全光信号处理技术对所有光通道信号波形进行再生处理,在消除非线性效应的同时,对其他传输信号失真(比如 PMD)也进行了纠正补偿。

3 研究内容

3U 光传输的研究分为以下 5 个方面。

3.1 160×100 Gbit/s 2 000 km 的 3U 光传输基础理论验证系统

以实现 160×100 Gbit/s 2 000 km 的 3U 光传输基础理论验证系统为目标,围绕光传输的基础理论展开,研究超高速光传输系统所需的理论模型和方法,实现超高速光传输系统的高效化、长距化和动态化。研究内容如下。

(1)建立超高速光传输系统的理论模型,对 3U 系统信道容量限进行论证

研究光通信系统容量限理论,建立适合先进光通信系统各种复杂条件(强非线性效应、色散影响大且复杂、高速传输、适合多种调制格式及编码方式、具有象限阵阶数同时进行非线性补偿)的香农定理模型,推导出全新的适合 3U 系统的信道容量限,同时将理论在实验系统中验证并根据验证结果进行补充、改良,以保证理论与实际系统的完美契合。

项目简介

- 针对 DWDM 各个通道非相关导致非线性效应难以抑制、相关接收本振锁相技术过于复杂等问题,提出光载波源自相关、各光通道全同步和宽带高相干性种子光源机制,在 3U 光传输相关发射与接收理论和方法上取得突破,对全光信息处理有实际借鉴意义。
- 针对光传输谱效率低的问题,提出 3U 系统高谱效率光编码调制基础理论和方法,将谱效率提高 2 倍以上,并为其其他光网络奠定理论基础。
- 针对 3U 光传输因非线性影响(数十倍于 10 Gbit/s 系统)无法实现的问题,提出全波段非线性抑制及其动态协同理论,实现全波段准线性传输;为非线性问题向准线性过渡提供思路及方法。

“973”计划“超高速超大容量超长距离光传输基础研究”项目由武汉邮电科学研究院牵头,着重解决光通信前沿热点和工程应用中的重大基础理论问题,形成具有国际影响力的源头创新成果和知识产权,创新点突出,产学研一体化特色明显。



(2) 完成超高速光传输的体系结构设计

研究超高速光传输过程中非线性效应、色散、调制格式及编码方式等复杂因素之间的相互作用及相互影响,综合各个因素的不同机理建立完整的适合超高速光传输的体系结构,确保系统性能得到最适当的优化。

(3) 构建 160×100 Gbit/s 2 000 km 的 3U 光传输基础理论验证系统实验平台

研究全波长自相关光源,采用异地相关光源传送模式,实现具有 FEC 的新型高速调制信号的超长距离传输,采用相位敏感型参量放大器与超高精度色散管理克服光纤中的色散、损耗、多种非线性效应等影响,在理论研究及局部验证的基础上,构建超高速、超大容量、超长距离光传输基础理论验证系统实验平台。

(4) 设计并验证系统方案,检验超高速光传输演示系统的性能

以之上所获得的各项研究理论成果为指导,综合考虑各环节的相互作用及相互影响作出合理且全面的调整,建立正确的实验验证系统方案,使得各环节有机结合在一起以同时达到最优性能,进而检验超高速光传输演示系统的性能。系统整体框架如图 1 所示。

3.2 全光多波长自相关光源的产生及非本振相关接收

针对 3U 光传输系统中光源问题,围绕其产生机理及实现方法、所产生相干信号在系统中传输及非本振相关接收等关键问题,具体研究多波长、自相关、相位噪声超低的信号产生及精密合波理论和实现方法;研究多通道自相关双波长传输过程中信号非线性损耗消除问题;研究相关接收过程中非本振相关的具体实现方法。

(1) 全相干发射与接收

针对大容量信息传输系统的要求,在发送端利用超连续谱产生全通道自相关多波长光源。由于超连续谱产生的机理,该光源具有频率、相位、时延和功率同时可控的优点,且固有的相干性良好。因此可以通过梳状滤波器将该光源输出的多波长序列分为正交的两路,其中一路波长用于承载信号,另一路波长用于远端非本振相关接收,如图 2 所示。这样既可以通过所谓的非本振相关接收使整个系统具有相干光通信的超强能力,同时又不需要苛刻的本振相干接收光源。此外基于光载波同源自相关和各光通道全同步模型,提出的宽带高相干性种子光源机制也将有利于非线性效应的抑制。

(2) 发送端

基于超连续谱的多波长光源具有以下优点:可实现全

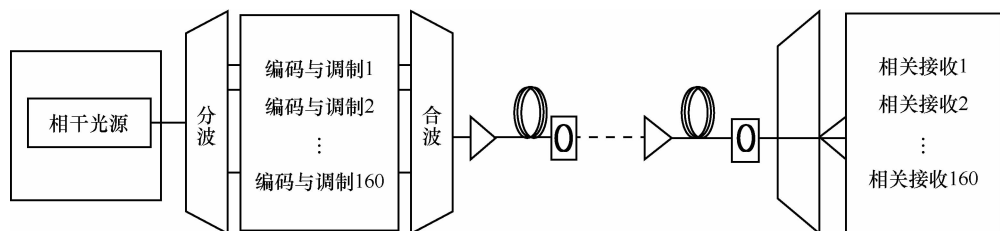


图 1 3U 光传输系统框架

学术团队

“973”计划“超高速超大容量超长距离光传输基础研究”项目由武汉邮电科学研究院牵头,其他主要承担单位有:复旦大学、北京邮电大学、华中科技大学、西安电子科技大学。

在首席专家、项目组专家以及责任专家的指导下,项目组成管理办公室,并设立专门的人员对项目进行组织和管理。团队机构由首席科学家、专家委员会、管理办公室组成,项目包含 5 个子课题。

课题一:160×100 Gbit/s 超长距离光传输的理论和实验验证。承担单位为武汉邮电科学研究院。主要研究内容和目标为:以实现 160×100 Gbit/s 2 000 km 的 3U 光传输基础理论验证系统为目标,围绕光传输的基础理论展开,以其他课题为支撑,研究超高速光传输系统所需的理论模型和方法,实现超高速光传输系统的高效化、长距化和动态化。

课题二:全光多波长自相关光源及非本振相关接收。承担单位为华中科技大学。主要研究内容和目标为:研制出多波长超低相位噪声全通道自相关光源,实现多通道非本振相关接收。

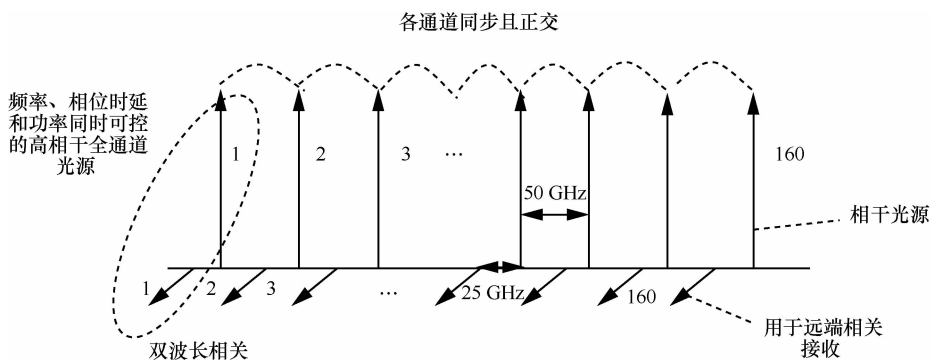


图2 全相干发送与接收工作原理

波段、功率均衡的多波长输出;良好的相干性;稳定精确的输出波长间隔(取决于抽运脉冲重复频率);稳定精确的输出脉冲重复频率(等于抽运脉冲重复频率)等。

当大功率的超短光脉冲在非线性光学介质中传输时,即可形成超连续谱。它是非线性光学介质中的SPM、XPM、FWM及SRS等非线性效应和群速度色散共同作用的结果。对于超连续谱而言,光谱的宽度和平坦度是衡量光谱质量的两个重要因素。合适的抽运光源和非线性光学介质的选择将有利于这两个指标的优化。

如图3所示为全相干发射端结构。同步时钟由一个25 GHz的射频信号源提供。考虑到系统中单波长的工作

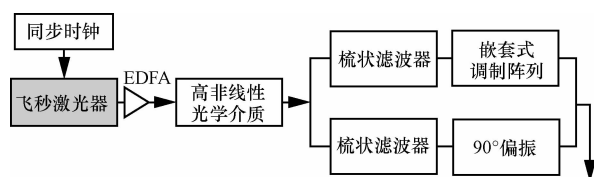


图3 全相干发射端结构示意图

速率为100 Gbit/s,因此抽运光源是一台能实现飞秒量级超短脉冲输出的锁模激光器。锁模激光器输出的飞秒量级超短脉冲经掺铒光纤放大器助推放大后,以很高的功率进入高非线性光学介质(如色散平坦光纤、高非线性光纤以及光子晶体光纤)中形成超连续谱,得到一个频率间隔为25 GHz的多波长序列。经过梳状滤波后分为频率间隔为50 GHz正交的两路多波长序列,其中一路波长用于承载信号,另一路波长用于远端非本振相关接收。

使用具有小正常色散的光纤和选择合适的抽运条件可以产生宽带、平坦的超连续谱输出。同时在输出端加上非线性光学环境等可饱和吸收体能够实现输出单个纵模线宽的压缩和信噪比的提高。

(3)接收端

在传统的相干光通信系统中,信号光到达光接收机端时,通过混频器与光接收机端的本振光进行混频,产生一个中频信号(即信号光与本振光的差频)。然后该中频信号再经过放大、滤波和解调后,还原为光发射机端的数字信

学术团队

课题三:高谱效率的光编码和光调制。承担单位为复旦大学和西安电子科技大学。主要研究内容和目标为:提出高效编码调制新方案,实现基于 q 元LDPC的编码调制和叠加编码调制;实现基于全光OFDM、DQPSK等先进调制格式的单通道光传输。

课题四:高增益、宽带宽、高平坦度、超低噪声的参量放大。承担单位为北京邮电大学。主要研究内容和目标为:实现高增益、大带宽、高度平坦、带宽和窗口均可动态配置的光参量放大器;实现接近量子极限超低噪声光参量放大。

课题五:超高速光传输非线性抑制与高精度色散管理。承担单位为华中科技大学。主要研究内容和目标为:完成高速光传输非线性机理建模,提出有效抑制非线性的方法;实现高速光传输复杂色散精密测量与精密补偿管理。

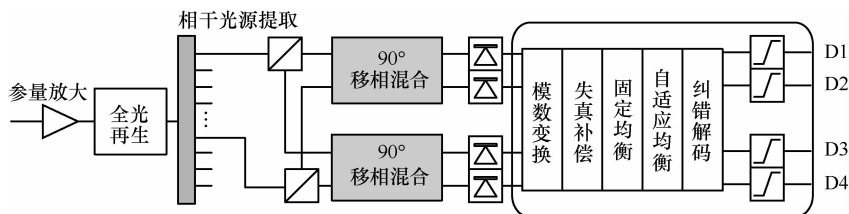


图4 全相干接收端结构示意图

号。可见光接收机端的本振光频率稳定性是相当重要的。针对3U光传输的要求,一方面非相干接收无法满足,另一方面相干接收本振(LO)锁相技术又过于复杂,难以实现(比如光载波频率为百THz量级)。在此背景下,建立随路双波长传输、远端非本振相关接收理论,其接收端结构如图4所示。利用全同步超相干光源产生具有良好频率、相位、时延可控性的若干自相关波长对(即信号光和远端本振光),通过超窄带梳状滤波精密合波技术,可实现非本振相关接收。同时在光接收机端结合电域的数字信号处理,包括固定均衡、自适应均衡和失真补偿等,能有效保证相位的要求,确保相关接收的实现。此外,使用远端本振使得远端本振光与信号光经历同样的时域和频域噪声,这样在接收机端经过相干接收就避免了时域和频域抖动。这些技术都能有效克服本振接收时的相应缺点。

3.3 基于先进调制格式及编码方式的全光、高谱效率的光发射/接收

针对3U光传输的科学问题,研究100 Gbit/s速率前向纠错编码(FEC)理论,提出实用的码字结构方案,结合多阶调制、正交光调制和全光OFDM调制格式,实现具有上述功能的光发射和接收。

(1)基于香农理论建立适应光纤传输信道和发射接收系统的准线性近似、非线性预补偿和相干接收的复杂模型

信号在光纤中传播时主要有3个效应同时起作用,即放大器自发辐射、材料色散和波导色散、实时的光纤Kerr非线性效应。当前用香农理论来分析光纤信道都做了很大近似,需要假设信道具有较弱的非线性效应、低色散和传输速率限制。由于这些研究中没有考虑调制方式、象限阶数和非线性补偿问题,使得该理论模型具有重大缺陷。从图5可见,使用传统的幅度键控调制的光通信系统随信噪比增加将偏离香农定理决定的最大系统容量。基于香农理论建立先进光通信系统的复杂模型,涵盖高频谱利用率、多极性振幅和相位调制、高速准线性传输、发射机预失真反向补偿非线性效应和相干接收等前沿技术。该理论模

型的建立,将拓展香农理论在光信息领域的应用,解决光通信系统与香农定理的偏离问题,为未来光通信的发展指出可行性方向,具有重大的理论和实用意义。

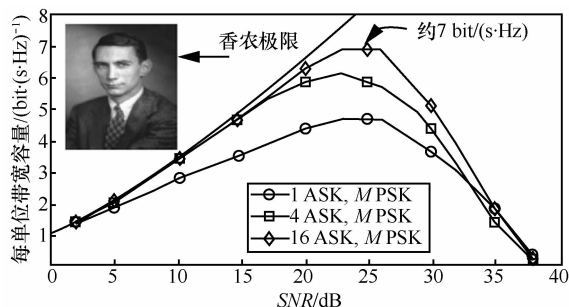


图5 香农定理与光通信系统不同调制方式的失配曲线

(2)逼近香农理论限的实用信道编码

LDPC具有多种译码算法和代数构造算法,性能较好的译码算法,复杂度较高,而复杂度较低的译码算法,其性能较差。LDPC译码算法的多样性,提供了性能与复杂度折中的多种方案。针对高速光纤信道对纠错码的特殊要求,研究方案如下:利用有限几何或投影几何构造高码率,构建长分组的结构化LDPC;利用BIBD技术构造高码率,构建中等分组长度的结构化LDPC;研究适合上述两种码的具有低复杂度、高性能的译码算法;评估上述LDPC方案和其他几种超强FEC方案在性能和编译码复杂度方面的优劣。循序渐进,以期在逼近香农理论限的、适于高速光纤通信系统的实用信道编码系统设计理论方面获得突破。

为了充分利用频谱资源,抵抗信道间的相互串扰,实现超高速、超高容量的光纤传输,研究高谱效率的光调制技术是一个非常重要的内容。结合系统容量极限理论,根据光信道和发射接收端的准线性近似、非线性预补偿和相干接收等机理,建立光发射/接收的有效模型,研究高频谱效率的超正交光调制格式,提出具有高谱效率相位平滑多进制、多维度光调制解调的新方法;同时研究全光正交频分复用(全光OFDM)理论与技术,设计并制作基于平面光波导(PLC)的差分正交相移键控/幅移键控(DQPSK/ASK)、

全光 OFDM 等集成化调制解调器。

3.4 高增益、宽带宽、高平坦度、超低噪声的参量放大

从光场热振幅及波动理论出发,研究参量放大(OPA)中噪声产生的机理,进而研究相位敏感的光参量增益放大对噪声的抑制机理,提出接近量子极限超低噪声及相位再生的 OPA 实现方案。根据硅基及新型光子晶体光纤中参量放大的机理,研究利用新型参量增益介质实现性能优异的光参量增益放大。

(1) 接近量子极限超低噪声的光纤参量放大

理想情况下,光纤参量放大器有极低的噪声指数,但是实际方案中影响光参量放大器噪声特性的有如下 4 个影响因子:AQN(放大的量子噪声),泵浦的小范围波动引起的相位失配进而影响增益谱,由于使用 EDFA 放大泵浦源而引起的 ASE 噪声,泵浦波动转移给信号增益的波动。以上 4 类噪声通过 OPA 之后对信号的噪声特性影响是非常显著的。在光纤参量放大的耦合模方程中引入噪声项,通过分步傅立叶法对方程组进行解析,分析各因素对噪声指数的影响,进而设计减小噪声的方案,使得噪声性能接近量子极限 3 dB。其中,量子噪声起源于光场的量子起伏,与输入信号与否无关,是系统固有噪声,故相位不敏感的放大器噪声指数最小也只能为 3 dB。拟采用多种方案降低其余各种噪声。其中,ASE 噪声中带外噪声通过带通滤波器滤除,带内噪声采用频谱扩展技术抑制,原理如图 6 所示。

图 6 中,输入光信号经过调制后展宽至 f_m ,展宽后的信号在通过光放大器时附加了带内 ASE 噪声。对二者进行解调,原始信号通过解调过程恢复,而 ASE 噪声进一步展宽至 $2f_m$,此时,ASE 噪声的频谱密度减半,信噪比因此改善了 3 dB,进而抑制了 ASE 噪声。

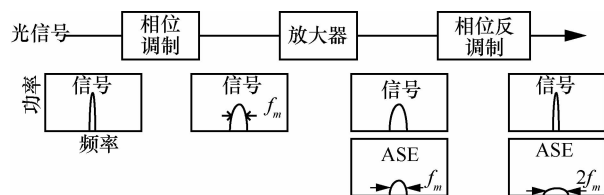


图 6 频谱扩展技术抑制 ASE 噪声原理

(2) 获得宽带、大增益、平坦度好的 OPA

光参量放大器增益:

$$G_s = \frac{P_s(L)}{P_s(0)} = 1 + \left[\frac{\gamma P_p}{g} \sinh(gL) \right]^2$$

带宽:

$$B_c = 2(\lambda_p - \lambda_s) = 2\sqrt{\frac{\gamma P}{\frac{\pi}{\lambda_0^2} \frac{dD}{d\lambda} (\lambda_p - \lambda_0)}} \\ = 2\sqrt{\frac{\ln(4G_s)}{\frac{2\pi}{\lambda_0^2} \frac{dD}{d\lambda} (\lambda_p - \lambda_0)L}}$$

其中,参量增益系数 $g = \sqrt{(\gamma P_p)^2 - (\kappa/2)^2}$,相位失配量 $\kappa = \Delta k_M + \Delta k_W + \Delta k_{NL}$ 。由以上式子可知,峰值增益与光纤长度、泵浦功率、非线性系数有关;增益带宽与泵浦功率、非线性系数、光纤长度、零色散波长、泵浦光波长、色散斜率等有关,针对以上各参数进行优化配置,实现高性能参量放大。

增大峰值增益的方法有:提高增益光纤的入纤光功率,采用非线性系数大的光纤、光纤级联;抑制布里渊散射,提高布里渊散射阈值;采用准相位匹配(QPM)技术。

增大增益带宽的方法有:提高有效泵浦光注入功率,优化光纤长度;使泵浦波长靠近零色散波长,设计合适的零色散波长变化;偏振方向相互垂直的双重泵浦技术,并使两泵浦光关于零色散波长对称分布;减小色散斜率。

增加增益平坦度的方法有:多段高非线性光纤(具有不同零色散波长与光纤长度)的层叠结构;增益均衡技术;使用双泵浦结构,并使得泵浦偏振方向平行,可以减小参量放大的偏振敏感性,提高增益平坦度。

(3) 基于 OPA 实现全光 3R 再生

在 3U 系统中,信号在达到目的地之前需要经过多个 OPA 而传输超长距离,光纤色散及非线性效应会使信号发生劣化。因此,具备高速 3R 再生的 OPA 是实现 3U 的关键技术。拟采用泵浦信号调制的光纤参量放大器实现无频移的全光 3R 再生,如图 7 所示。

由劣化信号中恢复时钟脉冲,并利用此时钟脉冲对泵浦光进行调制,调制后生成的泵浦与劣化后信号同时输入新型参量介质(硅基或新型光子晶体光纤)中实现参量放大及再生。

在本方案中,时钟信号的恢复源于劣化信号本身,所以对信号速率透明;另外,本方案结构简单,有很高的响应速率,信号再生的同时可以获得增益。

3.5 超高速传输系统中高精度多阶色散管理及信号非线性损伤的抑制

因工艺、类型、距离、时间等多维度动态变化,色散变化复杂,现有的色散补偿方法残余色散高达 50 ps/nm(单

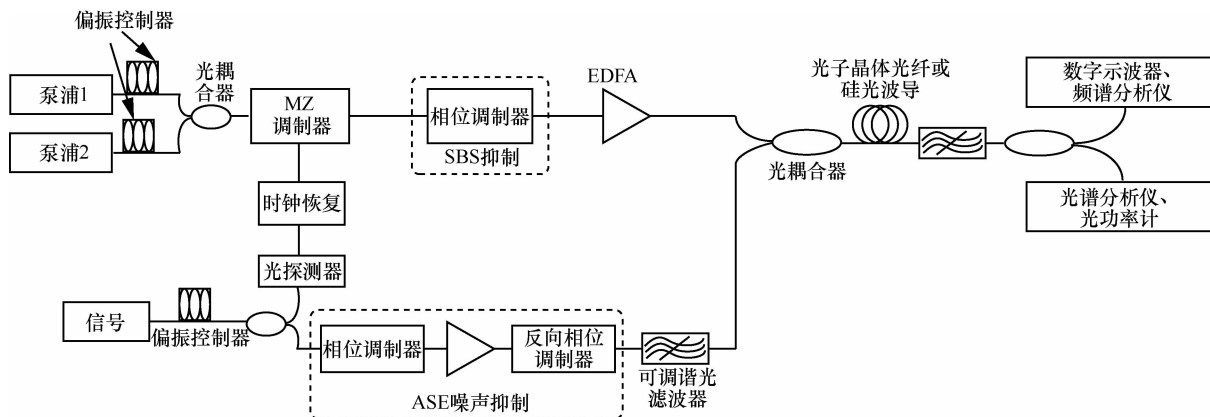


图 7 无频移 3R 再生 OPA 原理

通道),难以满足 3U 系统的需求。针对上述问题,以实现信号传输过程中非线性色散的协同动态补偿为目的,围绕非线性和色散的产生机理、相互作用和转化机制,研究在超高速光传输系统中非线性影响与传统光传输系统的不同特性,实现非线性与色散的动态协同补偿。

(1)针对全同步、异地相关光源传输体系和多维多阶复杂调制格式下的色散和非线性效应作用建立一体化分析模型。采用模块化仿真模型设计思想,基于非线性光纤光学、量子力学、半导体光电子学和物理光学建立宽带全相干光源、光调制器、光纤、光接收机、色散管理和非线性补偿模块的仿真模型。各个模型具有自己的输入输出接口,既可以独立工作,又可以通过统一的数据接口进行互联互通。模型设计时提供与真实器件性能指标参数对应的数值属性设置,便于器件与模型的相互转换。在此基础上,通过各个模型独立的和系统的仿真数值分析,探寻新传输体系下非线性和色散协同作用导致的不同调制格式下传输信号畸变、时延、抖动、串扰和损耗问题的机理与表现规律,分析其对系统频谱效率、传输距离和系统容量的影响,在此基础上实现各种类型调制格式、光源和器件设计参数的自动优化。进而根据研究结果发展信号预失真和接收端色散和相位补偿的有效方法,指导色散管理和非线性补偿模块的设计。

(2)基于四波混频和受激散射实现高精度的色散测量。通过所建立复杂的受激散射放大下四波混频光脉冲传输模型和快速傅立叶变换获取线性相位失配沿光纤的变化情况,进而推导色散参量沿光纤长度的空间分布,总的色散值通过积分获得。利用复杂的信息处理算法可以直接测量三阶色散和四阶色散的比值,实现四阶色散的直接测量。

(3)将高精度色散管理设计为静态可调 and 动态可调两部分,分别应用于光纤传输线路和接收端,具有不同的色散要

求。静态可调部分用于补偿绝大部分的线路色散。动态可调部分则基于光色散芯片和色散调整单元,光色散芯片采用阵列波导结构,可以实现独立的色散及色散斜率调整,并能够在调整单元的控制下根据各个通道剩余色散的大小和色散测量数据对所有光通道进行多阶精确色散控制和均衡。

3.6 总体架构

综合以上 5 个方面,将最终完成 3U 光传输的基础理论与关键技术的研究以及相关的实验验证。其实现的技术路线如图 8 所示。

“973”计划“超高速超大容量超长距离光传输基础研究”项目根据研究内容设置了 5 个课题,分别是:

- 课题一,160x100 Gbit/s 超长距离光传输的理论和实验验证;
- 课题二,全光多波长自相关光源及非本振相关接收;
- 课题三,高谱效率的光编码和光调制;
- 课题四,高增益、宽带宽、高平坦度、超低噪声的参量放大;
- 课题五,超高速光传输非线性抑制与高精度色散管理。课题之间的关系如图 9 所示。

4 验证平台及重要实验

3U 光传输试验平台系统由光发送端设备、光线路中继放大设备、光线路增益平坦设备和光接收端设备构成,其原理如图 10 所示,其中各部件作用如下。

光发送端设备:光发送端设备放置在 3U 光传输试验平台系统的局端,其主要功能是将多路 100 Gbit/s 速率的数据信息分别调制到间隔为 50 GHz 的不同光波长上,然后分别经过 C/L 波段合波和功率放大后,通过滤波片型 C/L 波分复用器合并在一根光纤里输出。

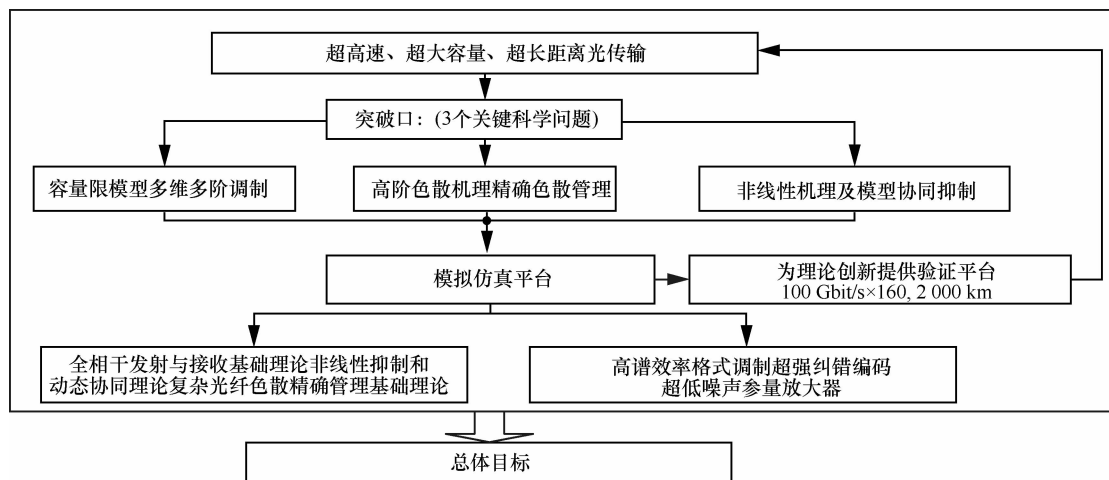


图 8 技术路线

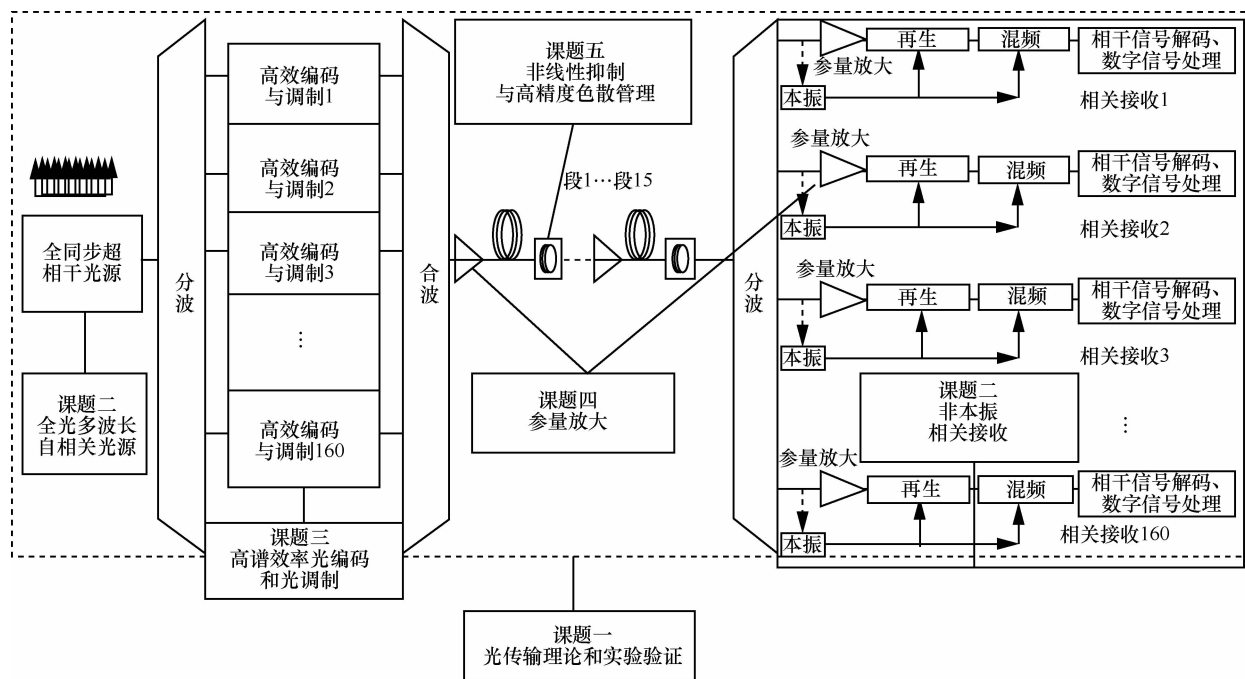


图 9 课题之间的相互关系

光线路中继放大设备：光线路中继放大设备放置在 3U 光传输试验平台系统的各个中继站点上，其主要功能是将经过 80 km 线路传输衰减的 C/L 波段光信号分别通过前置放大、色散补偿和功率放大后继续传输。

光线路增益平坦设备：光线路增益平坦设备放置在 3U 光传输试验平台系统的多级光线路中继放大设备之间，每间隔 8 级中继放大做一次增益平坦，用于弥补 8 级中继放大后各波长通道积累下来的增益差，使各波长通道输出的光功率值接近。

5 年间项目组建立了以百太比特级、超大容量、超高速

2 000 km 光传输为代表的多套系统平台和超高速调制解调算法体系，完成了多个国际领先或国际先进的系统实验，主要包括：

- 4 Gbit/s 400 km(标准单模光纤)无中继超长跨距实时光传输系统，相当于 5 万对人同时在一对光纤上通话；
- 240 Gbit/s 实时相干光、正交频分复用 48 km(标准单模光纤)光传输系统，相当于 300 万对人同时在一对光纤上通话；
- 单光源 1 Tbit/s 相干光、正交频分复用 1 040 km 传输技术与系统，相当于 1 250 万对人同时在一对光纤上通话，这是 2010 年已报道的全球最高水平；

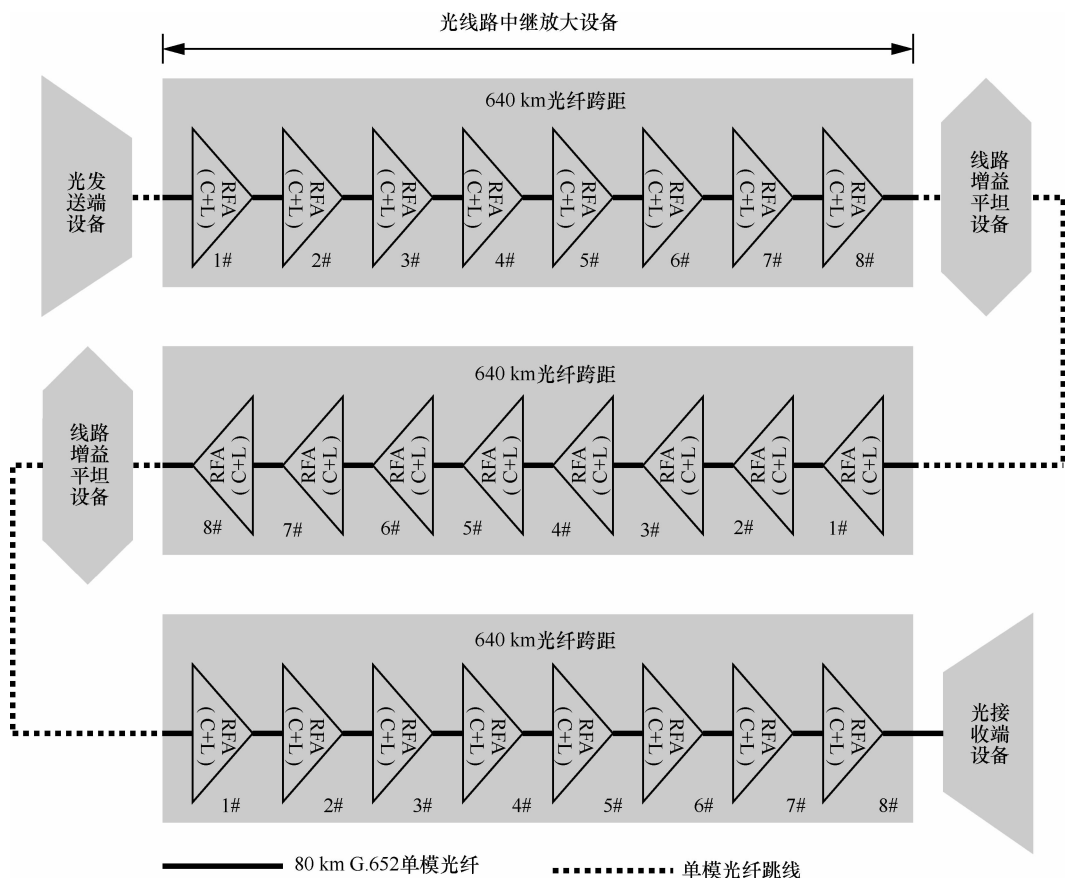


图 10 验证平台总体框图

- 1.03 Tbit/s 12 160 km(标准单模光纤)光传输系统实验,这是 Tbit/s 级传输全球最远距离,相当于 1 280 万对人同时在一对光纤上通话;
- 单光源 32 Tbit/s 2 087 km(标准单模光纤)实时光传输系统实验,相当于在一对光纤上 4 000 万对人同时通话;
- 168×100 Gbit/s 正交频分复用 2 240 km (标准单模光纤)光传输系统实验,相当于 2.1 亿人同时在一对光纤上通话;
- 30.7 Tbit/s 超大容量 80 km(标准单模光纤)光传输系统实验,相当于 3.8 亿人同时在一对光纤上通话;
- 67.44 Tbit/s 超大容量 160 km(标准单模光纤)光传输系统实验,相当于 8.4 亿人同时在一对光纤上通话;
- 100 Tbit/s 超大容量 80 km(标准单模光纤)光传输系统实验,相当于 12.1 亿人同时在一对光纤上通话,使我国步入具有百太比特级实验能力的国家行列。

通过这些实验,充分验证了针对 3 个科学问题所提出的各项理论和方法的正确性,为我国 3U 研究的跨越式发展提供了核心技术和平台支撑。

5 成果总结

“973”计划“超高速超大容量超长距离传输基础研究”项目的多项研究成果达到世界先进水平,其中“单光源 1 Tbit/s LDPC 相干光 OFDM 1 040 km 传输技术与系统”经工业和信息化部科技司鉴定,与国际已报道的同类实验系统相比,达到了国际领先水平。

本项目不仅立足于 3U 光传输的基础理论与关键技术研究,还将多项研究成果推广到产业化应用中,在满足国家战略需要的同时也带来了社会效益。

协助光迅科技股份有限公司研究提出了一种基于 MEMS 微小外腔的可调谐激光器结构和采用新型 3×8 混频器芯片结构的集成相干接收机构造方法,国内率先完成了可调谐激光器、集成相干接收机、光性能监测模块(OPM)等核心器件的研制,其中 OPM 被国内外光通信主流厂商广泛采用,其他器件也先后投入以中国电信干线、广东移动、江苏联通等为代表的上百段实际工程应用。

提出了基于高阶调制和高码率纠错 LDPC、高陡降性

和高旁瓣抑制比的光 OFDM-OQAM 调制等方法,在保证谱效率的同时提升了系统传输性能,形成了系列的数字相干光通信算法,并协助烽火通信科技股份有限公司研制完成了 100 Gbit/s 线路侧收发模块,该成果已应用于国内运营商、马来西亚等商用系统工程中。

项目提出了多种新型高谱效率多维多阶调制格式,采用 CAP(无载波幅度和相位)调制方式实现了 10 Gbit/s、40 Gbit/s、60 Gbit/s 和 5×110 Gbit/s 传输实验,发表了有国际重要影响(ESI 相关领域排名位于世界前 0.1%~1%)的学术论文。提出了新型多模环形盲均衡处理算法和多模矩形盲均衡处理算法,高阶调制信号频谱效率突破 4 bit/(s·Hz),发表了有国际重要影响(ESI 相关领域排名位于世界前 0.1%~1%)的学术论文。项目在高谱效率单载波奈斯特调制、正交频分复用调制、多元低密度校验编码、全光傅里叶变换非线性噪声抑制、太比特级光分插复用等方面取得显著成果,在国内外学术期刊上共发表学术论文 345 篇,其中 SCI 论文 202 篇;申请发明专利 93 项,授权 6 项。共培养博士生 51 名,硕士生 134 名。本项目承担单位武汉邮电科学研究院为中央企业(转制院所),与国内高校复旦大学、北京邮电大学、华中科技大学、西安电子科技大学和国内运营商合作,在高谱效率单载波奈斯特调制、DFTS-OFDM 调制、多元 QC-LDPC、全光傅里叶变换非线性噪声抑制、太比特级光分插复用等方面取得显著成果和效益,成为国内的产学研结合和协同创新的范例。

6 结束语

本文从 3U 光传输研究的背景与意义出发,介绍了“973”计划“超高速大容量超长距离光传输基础研究”项目研究的紧迫性与重要性,给出了 3U 光传输的 3 个科学问题以及 5 项基本研究任务,包括理论与实验验证、多波长光源、光编码与光调制、参量放大、非线性抑制与色散管理,在研究获得的基础理论与关键技术的基础上,搭建了 3U 光传输的实验验证平台并完成了多项重要实验。

致谢:项目期间,武汉邮电科学研究院光纤通信技术和网络国家重点实验室团队,复旦大学迟楠团队,北京邮电大学余重秀和忻向军团队,华中科技大学刘德明团队、曹祥东团队、李蔚团队、傅松年团队、崔晟团队、黄本雄团队等,西安电子科技大学王新梅团队和文爱军团队,均在其中做了大量工作。5 年间先后得到赵梓森院士、邬贺铨院士、周炳琨院士、中国科学院计算机网络信息中心钱华林研究员、哈尔滨工业大学强文义教授、中国科学院电子学研究所崔大付研究员、南开大学

董孝义教授、西安电子科技大学马建峰教授、北京大学徐安士教授、北京邮电大学林金桐教授、工业和信息化部电信研究院张海懿高级工程师等多名专家的指导与帮助,在此一并表示感谢。

[作者简介]



余少华,男,武汉邮电科学研究院总工程师、教授级高级工程师、博士生导师,光纤通信技术和网络国家重点实验室主任,国家重点基础研究发展计划(“973”计划)首席科学家,国家高技术研究发展计划(“863”计划)网络与通信主题专家,中国通信学会会士,中国通信学会光通信委员会主任,主要研究方向为通信网络和光纤通信技术。



杨奇,男,博士,武汉邮电科学研究院高级工程师,光纤通信技术和网络国家重点实验室副主任,国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目首席专家,主要研究方向为高速光通信技术、相干光 OFDM 系统等。



薛道均,男,博士,武汉邮电科学研究院高级工程师,光纤通信技术和网络国家重点实验室光系统研究室主任,国家高技术研究发展计划(“863”计划)课题负责人,主要研究方向为光纤通信技术、光通信高速 ADC/DAC 关键技术等。



贺志学,男,武汉邮电科学研究院工程师,光纤通信技术和网络国家重点实验室光系统研究室副主任,主要研究方向为高速长距离光传输技术等。



黎偲,女,武汉邮电科学研究院工程师,主要研究方向为光纤通信技术、相干光 OFDM 关键技术等。

(收稿日期:2014-09-20)