

30.7 Tbit/s 相干光 PDM 16QAM OFDM 80 km SSMF 传输

贺志学^{1,2}, 罗 鸣^{1,2}, 李 超^{1,2}, 杨 奇^{1,2}, 杨 铸^{1,2}, 余少华^{1,2}

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

摘要:为了研究超高速大容量光传输系统关键技术,利用16路光源,每路光源采用相干光PDM(偏振复用)16QAM(16进制正交振幅调制)OFDM(正交频分复用)调制实现了单路传输速率为1.92 Tbit/s、C波段总速率为30.7 Tbit/s的80 km普通单模光纤传输系统。每路光源信道包含了45路光子信道,其频谱宽度为250 GHz,系统谱效率为7.68 Gbit/s/Hz。所有信道经过80 km传输后的误码率均低于第三代FEC(前向纠错)解码门限 2×10^{-2} 。

关键词:正交频分复用;相干光接收;谱效率

中图分类号:TN914

文献标志码:A

文章编号:1005-8788(2012)06-0001-03

30.7 Tbit/s signal transmission over 80 km

SSMF using coherent PDM 16QAM OFDM modulation

He Zhixue^{1,2}, Luo Ming^{1,2}, Li Chao^{1,2}, Yang Qi^{1,2}, Yang Zhu^{1,2}, Yu Shaohua^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Research Institute of Post and Telecommunications, Wuhan 430074, China)

Abstract: For the purpose of studying the key technologies for future ultra-high-rate large-capacity optical transmission systems, we realize a 16-superchannel WDM transmission of 1.92 Tbit/s/ch Polarization Division Multiplexed (PDM) 16QAM Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) over 80 km SSMF, the total data rate of which is 30.7 Tbit/s in C band occupancy. Each superchannel consists of 45 subchannels with a spectral width of 250 GHz and a spectral efficiency of 7.68 Gbit/s/Hz. The BER of all channels after 80 km transmission is smaller than 2×10^{-2} , the third generation FEC decoding limit.

Key words: OFDM; coherent optical receiver; spectral efficiency

0 引 言

互联网数据业务的爆炸式增长推动着高速波分传输的快速发展,现有骨干网络将无法满足日益增长的带宽需求。随着100 Gbit/s PDM(偏振复用)QPSK(正交相移键控)WDM(波分复用)的日渐商用,为了应对未来2 dB/年的数据量的增长^[1],各研究机构纷纷将光传输研究的目光投向了100 Gbit/s以后的单信道1 Tbit/s甚至更高速率,然而如何以现有的电子和光电器件水平实现T比特级的超高速传输速率,对实现1 Tbit/s的超长距离传输提出了巨大的挑战^[2-3]。目前普遍采用的方式是利用多光载波复用技术来实现T比特级的超高速传输速率,实验表明OFDM(正交频分复用)^[4]和Nyquist WDM(奈奎斯特波分复用)^[5]均为单信道T比特级传输速率常用的方式。而在OFDM方式中,基于eOFDM(电域正交频分复用)的Tbit/s光传输系统则具备高色散容忍度,能使用DAC(数模转换器)实现高频谱利用率的高级调制格式信号,并具有更加

方便的链路灵活上下路和性能监测特性及更好的实时性能,已成为T比特级超长距离传输的主流技术^[6-10]。我们采用eOFDM的方式,利用16个光源,每个光源承载1.92 Tbit/s的16QAM(16进制正交振幅调制)OFDM调制信号,实现了C波段总传输容量为30.7 Tbit/s的80 km SSMF(标准单模光纤)传输系统,单光源信号带宽仅为250 GHz,谱效率为7.68 Gbit/s/Hz。该结果在国内大容量传输领域处于领先地位,在国际上也属先进。

1 实验系统配置

图1所示为30.7 Tbit/s (16×1.92 Tbit/s)相干光PDM 16QAM OFDM 80 km SSMF传输系统结构图。在发射端,16个光源分为8路奇数路(中心频率分别为191.55、192.05、192.55、193.05、193.55、194.05、194.55和195.05 THz)和8路偶数路(中心频率分别为191.8、192.3、192.8、193.3、193.8、194.3、194.8和195.3 THz),8路奇数路光和8路偶数路光分别经过 8×1 保偏耦合器耦合,再

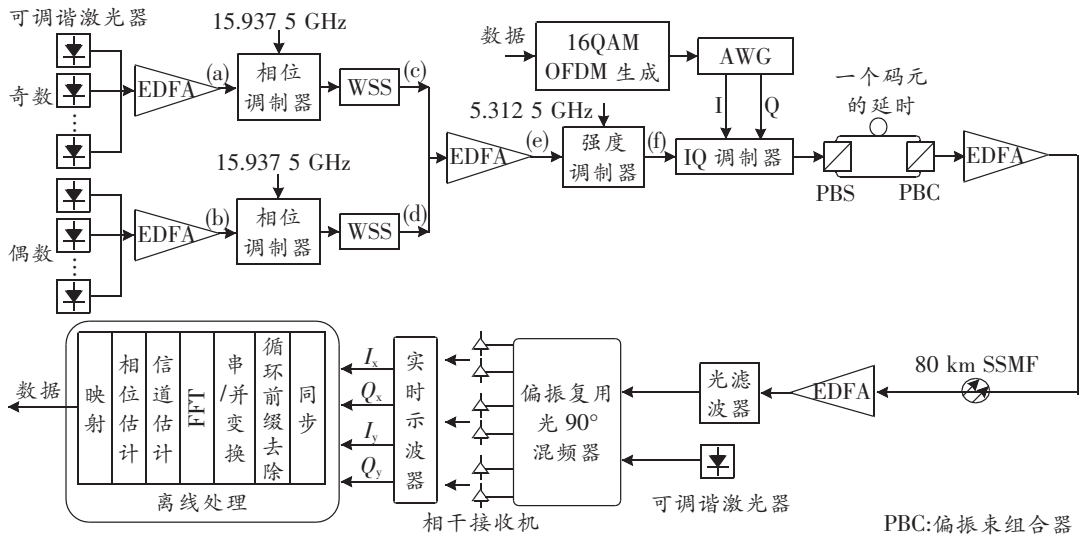


图1 30.7 Tbit/s (16×1.92 Tbit/s)相干光 PDM 16QAM OFDM 80 km SSMF 系统结构图

经过保偏 EDFA(掺铒光纤放大器)放大至 23 dBm 后,进入相位调制器生成多载波光。相位调制器分别被频率为 15.937 5 GHz、强度约为 1 W 的正弦波信号调制,调制后每个光源生成了 15 个以上的光子载波,每个光子载波间隔为 15.937 5 GHz。生成的多载波经过 WSS(波长选择开关)整形后,每路光源生成了 15 个光子载波,奇数路光和偶数路光经过 WSS 整形后,通过 2×1 耦合器耦合并经 EDFA 放大至 22 dBm,进入强度调制器,该调制器被频率为 5.312 5 GHz、强度为 10 mW 的正弦波信号调制后,每路子载波光被扩展为 3 路频率间隔为 5.312 5 GHz 的光子载波,由此产生了 720 路子载波光源,进入 IQ 调制器。传输信号是由 Matlab 编程产生,2¹⁵-1 的伪随机码经过映射变为 16QAM OFDM 基带信号,该基带信号包含 68 个带有有效载荷的子载波,其中有 4 个子载波作为导频用于估计相位,两个子载波用来抵消相干光接收时本振光源对信号的影响,总子载波数为 128 个。1/16 的码元时间作为循环前缀,AWG(任意波形发生器)的每个光子载波的发射速率为 10 GSample/s,故而其单个光子载波的信号发射速率为 21.3 Gbit/s。每路光源含有 45 个光子载波,其总发射速率为 0.96 Tbit/s,其单个光子载波有效信号发射速率为 18.3 Gbit/s,每路光源其总有效数据发射速率为 0.83 Tbit/s。生成的 16QAM OFDM 基带信号通过 AWG 生成 10 GSample/s 的 I、Q 两路射频信号并调制到光 IQ 调制器上,由此 720 路光子载波便同时搭载了 16QAM OFDM 信号,所有的信号源都与 AWG 通过 10 MHz 的同步信号锁定。AWG 发射的 OFDM 信号频谱与光子载波间的频率间隔一致,

因此两路相邻的光子载波是没有频率间隔的。经过调制的 OFDM 信号经过一个 PBS(偏振分束器)后,该 PBS 的一路相比另外一路延迟了一个码元时间,即 14.4 ns,用以仿真偏振复用状态,由此该系统的发端每路光源传输速率为 1.92 Tbit/s,总传输速率为 30.7 Tbit/s。信号经过 EDFA 放大后输入 80 km SSMF 传输。在接收端,经过 EDFA 放大和光滤波器滤波后,得到任意路的光子载波信号。调整相干接收端的本振光源的波长,利用相干接收对任意路的光子载波信号进行解调,通过平衡接收机的光/电转换输入进入实时示波器进行数据采集,信号由实时示波器进行模/数转换后,通过计算机离线处理得到恢复。离线处理通常包括信号同步、循环前缀去除、串/并变换、FFT(快速傅里叶变换)、信道估计和相位估计等,最终恢复解调出原始数据。

图 2 所示为 30.7 Tbit/s (16×1.92 Tbit/s)相干光 PDM 16QAM OFDM 80 km SSMF 传输系统光子载波产生及分布示意图。每路光源信道包含有 45 个间隔为 15.937 5 GHz 的光子载波,每路子载波都带有 21.4 Gbit/s PDM 16QAM OFDM 信号。如图 2(a)和(b)所示,16 路光源分为 8 路奇数路光(CH1、CH3、CH5、CH7、CH9、CH11、CH13 和 CH15)和 8 路偶数路光(CH2、CH4、CH6、CH8、CH10、CH12、CH14 和 CH16),奇数路和偶数路中相邻光源的频率间隔为 500 GHz。经过各自路的相位调制器调制后(即图 1 中的(c)、(d)点),奇数路光和偶数路光均被展宽为 15 个以上的光子载波,如图 2(c)、(d)所示;经过整形和耦合后,图 1 中(e)点的光源示意图如图 2(e)所示,变为了 16×15 路、强度在 2 dB 范围内波动的光子载波;再经过强度调制

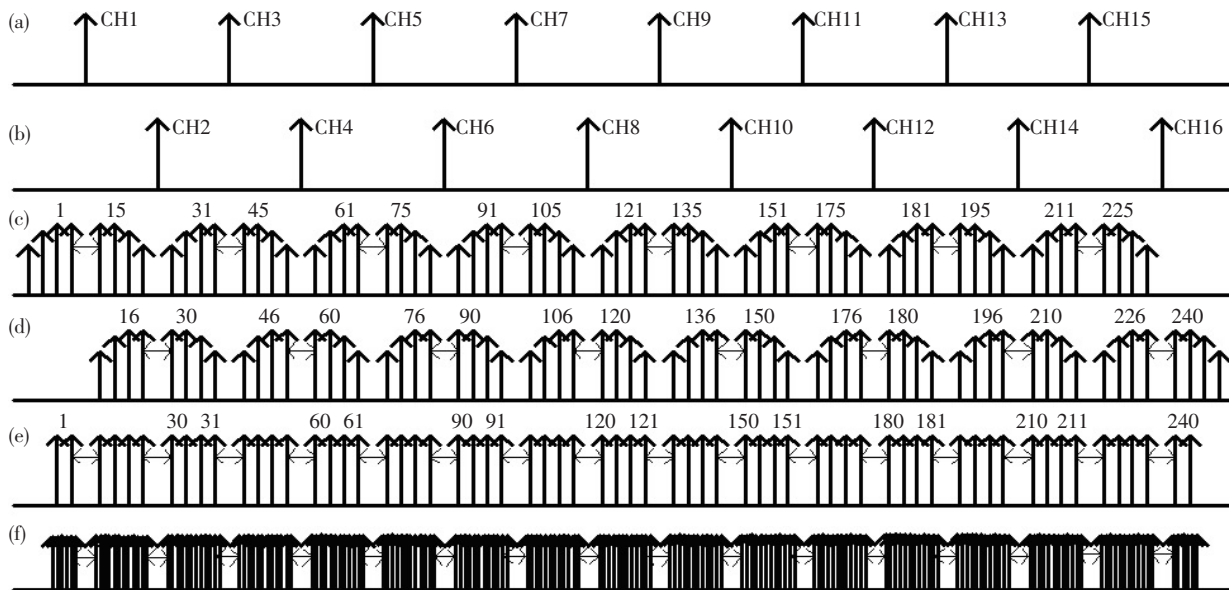
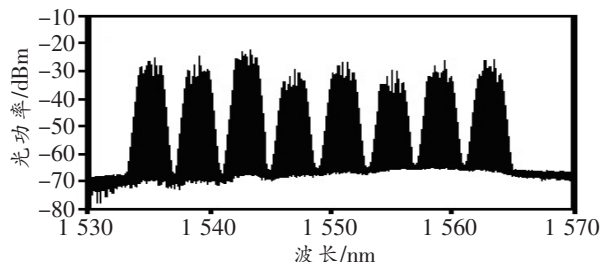


图 2 系统光子载波产生及分布示意图

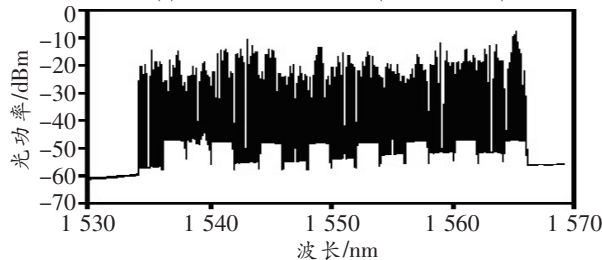
器,在图 1 的(f)点处,每路光子载波又被分为 3 路光子载波,其示意图如图 2(f)所示。由此每路光源产生了 45 路光子载波,总共产生 720 路光子载波。

2 结果及讨论

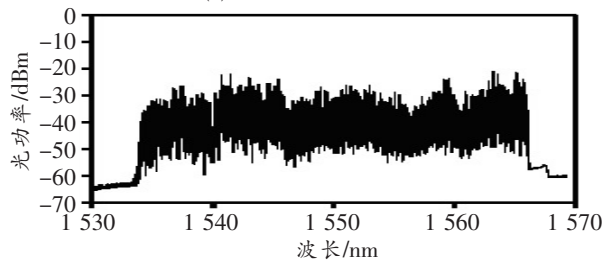
图 3 所示为系统中各点的光谱图,其分辨率均



(a) 经过相位调制器后(奇数路光源)



(b) 经过 WSS 整形耦合后



(c) 经过强度调制器后

图 3 光谱图

为 0.01 nm。图 3(a)为奇数路光源耦合后经过相位调制器调制展宽为 15 个以上的光子载波的光谱图。从图中可以看出,由于相位调制器的波长选择性,各个光源展宽时的幅度和各光子载波的分布不是很一致。图 3(b)为奇数和偶数路光源经过 WSS 整形后耦合为一路的光谱图。由于两路放大器的噪声基底不一致,导致合并后两路光源的噪声基底不一致。图 3(c)为经过强度调制器后的光谱图。由于未对各子载波进行整形,因此其频谱显得不是很平整。

图 4 所示为 30.7 Tbit/s 的 PDM 16QAM OFDM 信号经过 80 km SSMF 传输后的传输性能图。我们对每路光源中的 45 个光子载波的每 9 个测试其误码率,测试结果表明,所有的误码率均低于第三代 FEC(前向纠错)门限 2×10^{-2} 。接收端的接收频谱图见图 4 的下半部分,分辨率为 0.1 nm。

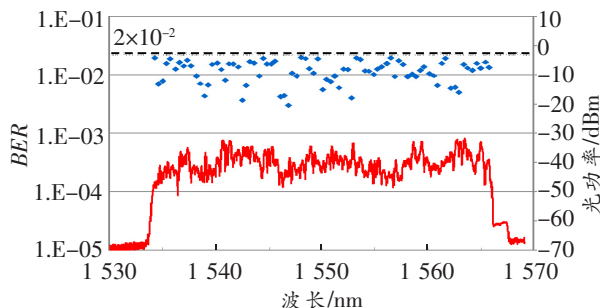


图 4 30.7 Tbit/s 的 PDM 16QAM OFDM 信号经过 80 km SSMF 传输后的传输性能图

3 结束语

利用相干接收和多载波频带复用的方式实现了

(下转第 63 页)