

可选频的多路波分复用光纤无线系统

韩一石 罗志霄* 覃新宇 郑振宇

广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006

摘要 研究了一种多路传输且频率可选的波分复用光纤无线系统。该系统可同时传输最多 4 路频率可选的下行毫米波信号和 2~4 路上行信号。经仿真实验,通过 7×8 数字光开关矩阵系统可产生 6 种倍频因子分别为 2、4、6、8、10、12 的毫米波信号,且多路不同频的下行毫米波信号在误码率为 10^{-9} 情况下经 50 km 单模光纤传输的功率代价范围为 1.21 dB~1.71 dB,同时多路上行信号功率代价为 1.10 dB~1.24 dB,系统体现了良好的抗色散性和均衡性。

关键词 光通信;波分复用;相位调制器;光生毫米波

中图分类号 TN914

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0505007

Frequency-Selectable and Multi-Channel Wavelength Division Multiplexing Radio-over-Fiber System

Han Yishi Luo Zhixiao Qin Xinyu Zheng Zhenyu

School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract A frequency-selectable and multi-channel wavelength division multiplexing radio-over-fiber system is studied. The system is able to transmit at most 4-channel frequency-selectable downstream millimeter wave (MMW) signals and 2-channel to 4-channel upstream signals. Simulation results show that the proposed system can generate MMW signals with different frequency multiplication factors by 7×8 digital optic switch, such as 2, 4, 6, 8, 10 and 12. After 50 km standard single mode fiber transmission, the power penalty of the downstream MMW signals is from 1.21 dB to 1.71 dB under the bit error rate of 10^{-9} , while the power penalty for upstream signals is from 1.10 dB to 1.24 dB. The proposed system is successfully verified with characteristics of equalization and dispersion mitigation.

Key words optical communications; wavelength division multiplexing; phase modulator; optical millimeter wave

OCIS codes 060.4510; 060.5060; 060.2330; 060.5625; 060.1810

1 引 言

光纤无线(ROF)技术充分结合光纤和高频无线电波传输的优点,能够实现大容量射频信号有线传输和超过 1 Gb/s 的超宽带无线接入^[1]。将波分复用(WDM)技术和 ROF 技术融合,利用 WDM 系统中的波长路由功能将多信道 ROF 信号分配给用户群,有助于实现 ROF 系统的网络化。与传统的数字光通信网络相比,ROF 网络系统具有良好的兼容性^[2]。同时,由于 ROF 系统中大部分的信号处理集中在中心站完成,使得它可以以低成本的基础设施需求来发展带宽移动服务^[3]。

目前针对 WDM-ROF 系统的设计实现方案主要有 2 类:

1) 多个激光器产生多个频道传输倍频毫米波(MMW)方案^[2,4-7]。如重庆邮电大学的潘武等^[2]通过多个激

收稿日期: 2015-12-29; 收到修改稿日期: 2016-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(61471130, 61202268)、广东省科技计划(2011B010200029, 2011B090400344, 2012B091100030)

作者简介: 韩一石(1970—),男,博士,教授,主要从事全光通信网络器件及光纤无线技术等方面的研究。

E-mail: yshan@gdut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: gxuwlxcb@163.com

光器和梳状滤波器实现了 60 GHz、2.5 Gb/s 的毫米波信号和 5 GHz、155 Mb/s 的差分相移键控(DPSK)信号的同时传输。湖南大学的 Cao 等^[6-7]通过多个激光器实现了多路有线和 60 GHz、58 GHz 无线的正交频分复用(OFDM)信号传输。但由于来自不同激光器的光波相位相干性较差,不同光源调制产生的光边带及这些光边带拍频产生的毫米波信号存在较大的相位噪声,因此在不使用光学注入锁定和光学锁相等方法的情况下,调制产生的光边带只能和同一激光器产生的其他边带拍频^[8]。为避免相位噪声的影响,文献[6]和文献[7]采用单一马赫-曾德尔调制器(MZM),结合双边带调制(DSB)方式实现 2 倍频(60 GHz 和 58 GHz)毫米波信号,但由于系统的倍频因子(FMF)较低,需要较高频率(如 29 GHz)的射频(RF)信号驱动 MZM。此外,文献[2]引入交错复用器(IL)实现载波抑制(CS)功能,DSB-CS 调制方式克服了光生毫米波功率随光纤长度发生周期性变化的问题,但在传输非归零码(NRZ)时仍会因为色散导致码间干扰而影响传输质量。

2) 通过锁模激光器或级联外调制器^[9]得到梳状波传输 ROF 信号方案。如法国高科的 Christophe Gosset 等^[10]和墨尔本大学的 Vidak 等^[11]通过锁模激光器得到梳状波,用于产生不同的频道。该方案虽然可行,但使用锁模激光器不仅增加了系统成本和复杂度,而且因为锁模激光器产生的光脉冲功率存在波动性,进而会对系统的稳定性和均衡性产生一定影响。虽然通过级联外调制器^[9]可以解决系统稳定性问题,但因为多个器件的级联导致插入损耗的增加,最终对产生的多路毫米波信号的功率造成影响。

文献[12]和[13]中提出的单光源平行相位调制器结构,无需额外的光滤波器和复杂电路驱动,仅通过一个器件参数设置即可生成频率间隔可调、功率较高的多个光边带信号。另外,随着阵列波导光栅(AWG)技术的发展,通过 AWG 进行波分复用的信道频率间隔可以低至 5 GHz,且通道数量达到 32 个^[14]。

采用双平行相位调制器(2-PPM)结构生成功率接近的 7 个光边带,再通过信道频率间隔为 15 GHz 的 AWG 作为波分复用多路分配器(AWG demux),将 7 边带拆分,在其中的 1~4 个边带上加载多路 2.5 Gb/s NRZ 信号并传输。在基站处通过 7×8 数字光开关矩阵将光边带进行拆分和两两组合,经光电检测器(PD)拍频得到对应频率的毫米波信号。综上所述,该系统可同时传输多路频率可选的下行毫米波信号,同时未加载下行信号的边带可以作为上行信号的光载波传输多路上行 NRZ 信号。

2 平行相位调制器的基本原理

文献[12]中平行相位调制器结构(PPM)可实现谐波的交错滤波功能,结构如图 1^[12]所示。模块由 2 个性能完全相同的相位调制器(PM)组成,调制器被频率为 ω_s 的正弦 RF 信号驱动,但相位差为 π 。

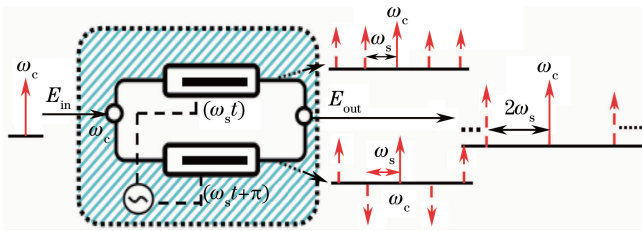


图 1 交错复用功能模块结构图

Fig. 1 Structure of proposed interleaver module

根据电磁场传播动力学理论,经耦合器耦合并经贝塞尔函数 $J(\cdot)$ 展开可得到输出端的表达式^[13]为

$$E_{out} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} E_c J_{2m}(\beta) \cos(\omega_c t + 2m\omega_s t), \quad (1)$$

式中 E_c 为模块的入射光功率, ω_c 为中心频率, m 为光边带的阶数, β 为调相指数。且有

$$\beta = \pi \frac{V_{RF}}{V_\pi}, \quad (2)$$

式中 V_π 为 PM 的半波电压,是固定值; V_{RF} 为射频电压。

由(1)式、(2)式可知,在 2-PPM 的情况下,只产生 $2m$ 偶数阶边带。且当光边带的阶数 m 确定的情况下,每阶光边带的功率只与 β 值相关。其中 $0, \pm 2, \pm 4, \pm 6$ 阶边带的功率随 β 变化的规律如图 2 所示。

从图 2 可以发现,当 $\beta = 6.38 \sim 6.39$ 时, $0, \pm 2, \pm 4, \pm 6$ 阶边带功率接近。当 $\beta = 6.38$, 且 2-PPM 被频率

为 7.5 GHz 的 RF 信号驱动时,可得到 $\omega_c = 193.1$ THz、功率接近且频率间隔均为 15 GHz 的 7 个光边带,得到的光频谱如图 3 所示。其中 $\pm 2, \pm 4, \pm 6$ 阶边带之间的功率差小于 0.2 dB, 0 阶边带功率比 ± 2 阶边带低 2 dB。用 $S_1 \sim S_7$ 分别对应各频率的光边带,对应关系如图 3 所示。

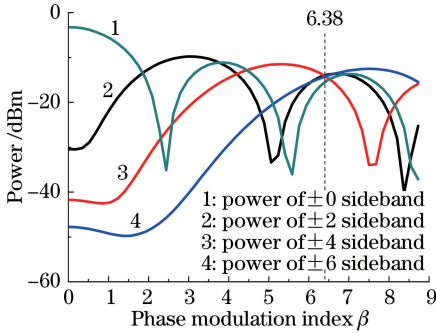


图 2 2-PPM 生成光信号各边带功率随调相指数 β 变化曲线图

Fig. 2 Power of sidebands generated by 2-PPM with the change of the modulation index β

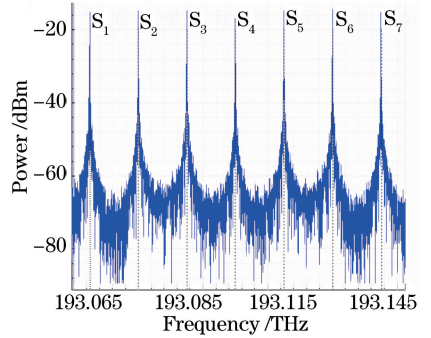


图 3 2-PPM 生成 7 个光边带频谱图

Fig. 3 7-sidebands optical spectrum of generated by 2-PPM

3 多路频率可选毫米波传输系统

3.1 多种边带两两组合拍频

基于以上结果可知,通过 2-PPM 产生的多个边带来源于同一光源,因此多个边带之间理论上不存在相位噪声,进而多个边带可以自由组合拍频得到多路可选频毫米波信号。且由于这些边带的功率接近,拍频生成的多路毫米波信号的功率差异小,均衡性好。图 4 给出了 3 种具有代表性的拍频方式,通过 7 个边带不同的两两组合方式,可得到多路可选频的下行毫米波信号。

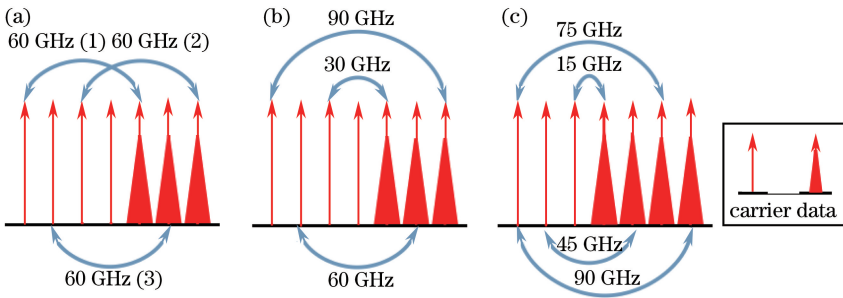


图 4 生成(a)3 路 60 GHz、(b)3 路 30、60、90 GHz、(c)4 路 15、45、75、90 GHz 毫米波的不同拍频方式

Fig. 4 Different beat frequency ways to generate (a) 3-channel MMWs of 60 GHz,

(b) 3-channel MMWs of 30, 60, 90 GHz and (c) 4-channel MMWs of 15, 45, 75, 90 GHz

以图 4(a)为例,3 路下行数据信号加载于 S_5, S_6, S_7 上,而对于未加载下行信号的边带(S_1, S_2, S_3, S_4),取 S_1, S_2, S_3 边带用 50 : 50 分光器分成功率相等的两部分。一部分与已加载下行信号的光边带配对耦合后得到 $[S_1, S_5], [S_2, S_6], [S_3, S_7]$ 共 3 组光边带,经 PD 拍频后可得到 3 路 8 倍频(60 GHz)的下行毫米波信号。分光后 S_1, S_2, S_3 的另一部分与 S_4 边带一同作为 4 路上行信号的载波。同理,图 4(b)和(c)中给出了 2 倍频(15 GHz)、4 倍频(30 GHz)、6 倍频(45 GHz)、8 倍频(60 GHz)、10 倍频(75 GHz)和 12 倍频(90 GHz)的对应边带组合方式。

由于在生成的 7 个光边带中 S_4 边带功率比其他边带低 2 dB 且位于频谱中央,为保证传输均衡性不宜将 S_4 边带分为两部分。 S_4 的使用方式可分为两种情况: S_4 未加载下行数据信号和 S_4 加载下行数据信号。通过改变 S_4 使用方式可改变上下行信道的数量,两种情况下边带组合拍频可生成的毫米波信号频率统计结果如图 5 所示。

在图 5(a)和图 5(b)所示的情况除 15 GHz 和 90 GHz 毫米波分别只有一种组合拍频生成方式外,其他

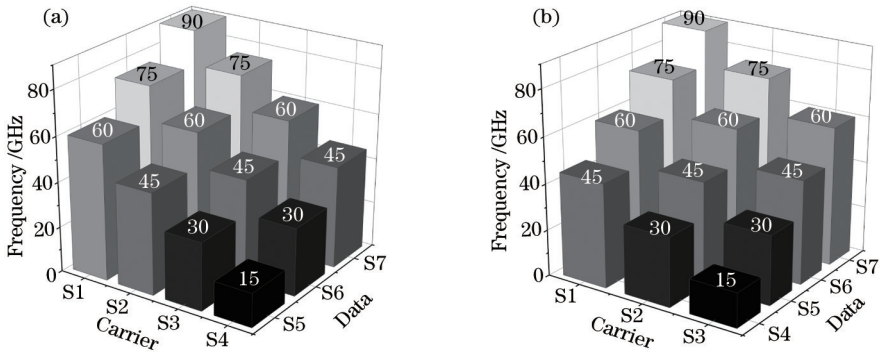


图 5 7 边带组合拍频情况生成的毫米波频率统计图。(a) S_1 未加载下行数据信号;(b) S_1 加载下行数据信号

Fig. 5 Frequency cartogram of MMWs generated by 7-sideband beat frequency. (a) S_1 used as carrier; (b) S_1 used as data

频率毫米波均可由 2~3 种方式生成。

3.2 7×8 数字光开关矩阵

文献[15]提出了一种体积小、响应时间短、易于集成的硅基串联双微环谐振腔全光开关。文献[16]提出了一种 2×2 低串扰聚合物交叉耦合串联五环谐振电光开关,该光开关串扰仅约 -60 dB,插入损耗平均约 1 dB,响应时间不足 100 ps,长宽仅 0.4 mm,切换电压为 4 V。

在此基础上,提出一种为 7 边带生成多路可选频毫米波而设计的 7×8 数字光开关矩阵,通过将多个 2×2 光开关以不同方式级联,联合使用分光器与耦合器,该矩阵可实现 7 个光边带的灵活拆分和两两组合,其结构如图 6 所示。

图 6(a)、(b)和(c)分别表示以图 4(c)、(b)和(a)方式进行边带组合时,数字光开关矩阵中各 2×2 光开

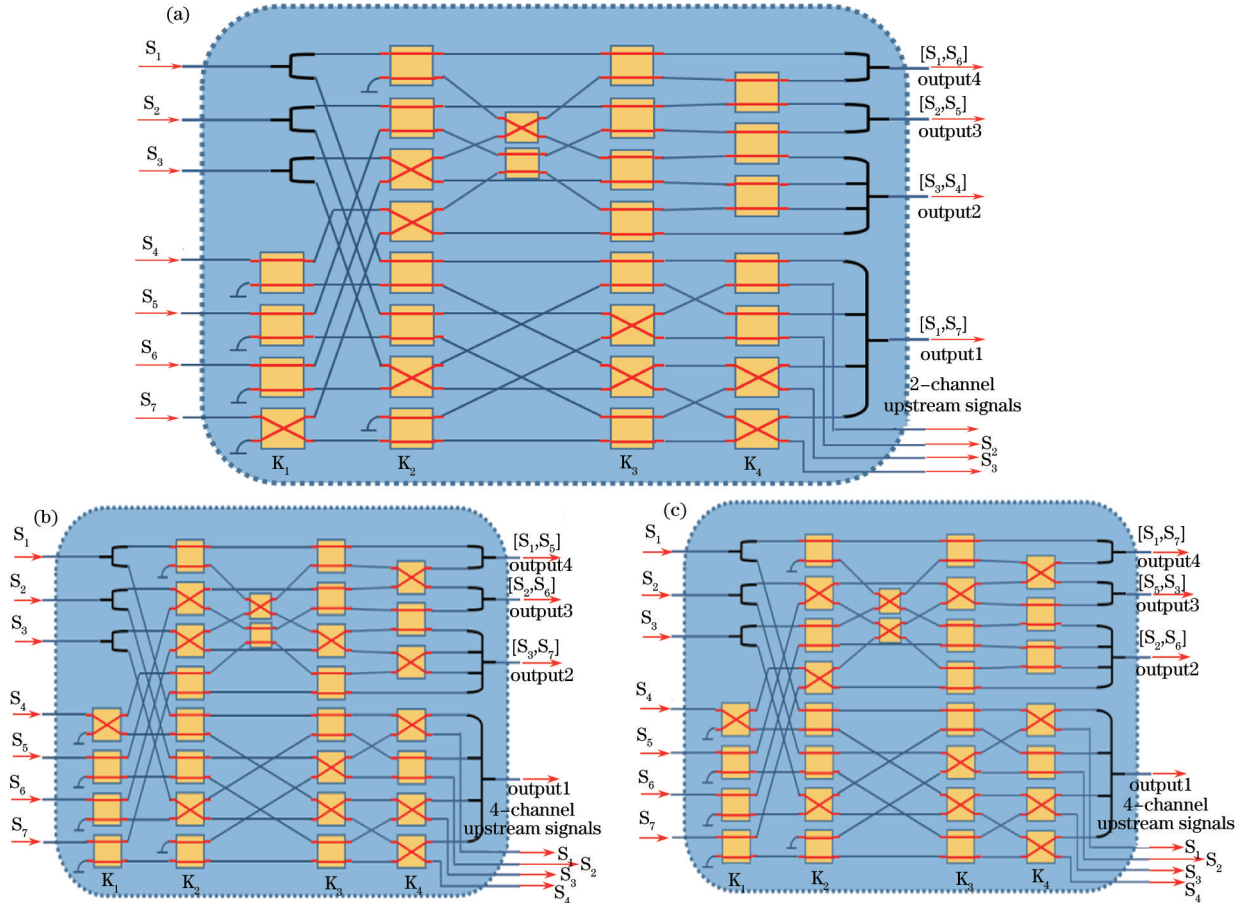


图 6 7×8 数字光开关矩阵模块结构图

Fig. 6 7×8 digital optical switch matrix structure

关单元的状态以及各输出端口的输出边带组合。

由图 6 可见,该结构分为 $K_1 \sim K_4$ 共 4 级,与传统的 BANYAN 结构^[17]相比, K_1 级的上半部分 4 个光开关被替换为了 3 个 50 : 50 分光器,用以将 S_1 、 S_2 、 S_3 分别分成功率相等的 2 份。在 K_2 级和 K_3 级之间额外加入了 2 个光开关并改变了对应的连接方式,同时 K_4 级的上半部分光开关连接方式也作了相应调整。联合使用 4×1 和 2×1 耦合器,使光开关矩阵模块的 4 个下行输出端口 output1~output4 的输出频率具有高度可选择性。具体说明如下:

1) 各输出端口的优先级排序如下:

$$P_{\text{output2}} > P_{\text{output1}} > P_{\text{output3}} = P_{\text{output4}} \quad (3)$$

2) output2 端口优先级最高,可在图 5 所示组合中任选其一。故可输出 2 倍频(15 GHz)、4 倍频(30 GHz)、6 倍频(45 GHz)、10 倍频(75 GHz)、12 倍频(90 GHz)共 6 种倍频的毫米波。

3) 在 output2 端口选定某频率后,output1 的选择分为两种情况:

① output2 已选择 15 GHz 或 90 GHz 频率输出,则由于这两种频率生成方式唯一,output1 端口可输出毫米波频率剩余 5 种;

② output2 未选择 15 GHz 或 90 GHz 频率输出,则由于频率生成方式的不唯一性,output1 端口可输出毫米波频率仍为 6 种。

4) output3、output4 端口优先级相等且较低,在两个高优先级端口选定后,由于某些频率毫米波已被选取,且光开关矩阵中部分 2×2 光开关单元状态已被锁定,故需根据具体剩余边带情况及光开关矩阵中各 2×2 光开关单元的已有状态进行选择。

以图 6(a)为例,当 S_4 边带加载数据信息时,对应图 5(b)所示。output2 端口有 6 种频率可选,假设其选定 $[S_3, S_1]$ (15 GHz),由于 15 GHz 和 90 GHz 毫米波生成方式唯一,故 output1 端口只能在剩余 5 种频率中任选其一,假设其选定 $[S_1, S_7]$ (90 GHz)。在此之后,output3 和 output4 端口需根据 output1 和 output2 端口的已选取情况及数字光开关矩阵中各 2×2 光开关的已有状态进行选取,但因 15 GHz 和 90 GHz 频率已被选择,故 output3 和 output4 端口不可能输出 15 GHz 和 90 GHz 毫米波。另外,由于需要传输 4 路下行信号,因此 output1 端口被占用,上行信道数量减少为 2 路。

综上所述,output2 端口可输出 6 种频率毫米波。output1 端口可输出的毫米波频率,根据 output2 端口的选择情况不同,可有 5~6 种。此外,output3 和 output4 端口在两个高优先级端口选定后,虽然边带组合和频率选择受到限制,但由于生成同一频率毫米波的边带组合方式大多不唯一,故其输出频率仍可在限定范围内选择。因此,通过 7×8 光开关矩阵可使系统实现最多 4 路频率可选的下行毫米波输出。

3.3 WDM-ROF 网络结构

基于以上结论,结合 WDM 建立了一个频率可选的多路 ROF 系统,如图 7 所示。经 2-PPMs 得到功率接近的 7 个光边带后由 AWG demux 作为波分复用器将各光边带拆分。3 或 4 路 2.5 Gb/s 的下行 NRZ 基带信号经 MZM 进行强度调制,分别加载在各下行载波边带上。耦合后的光信号被掺铒光纤放大器(EDFA)放大并经单模光纤(SMF)传输,再由 AWG demux 拆分,经 7×8 数字光开关矩阵对 7 个边带进行拆分和两两组合后拍频得到所需频率的毫米波信号。同时,数字光开关矩阵输出的 2~4 路未加载下行信号的光边带(S_1, S_2, S_3, S_4)将作为上行信号的载波。图 7 中系统使用的是图 4(a)所示的组合拍频方式,可以得到 3 路 60 GHz 的下行毫米波信号和 4 路上行信号载波。

另外,由文献^[14]可知 AWG 可实现 5 GHz、32 通道的波分复用,若单个光源生成的 7 边带信号频率间隔为 15 GHz,则可利用 AWG 的前 21 个输出端口分组实现 3 个光源的同时使用。设 3 个光源分别为 LD_1 、 LD_2 、 LD_3 ,则 AWG 的 1 端口对应 LD_1 的 S_1 ,2 端口对应 LD_2 的 S_1 ,3 端口对应 LD_3 的 S_1 ,4 端口对应 LD_1 的 S_2 ,此时 LD_1 的 S_1 和 S_2 的频率间隔为 15 GHz。按上述方式循环,该系统最多可实现 3 个光源、12 个基站的同时运行。

4 实验仿真与系统分析

4.1 实验仿真

仿真实验结构如图 8 所示。其中半导体激光器(LD)的中心频率为 193.1 THz,功率为 10 dBm,2-PPM

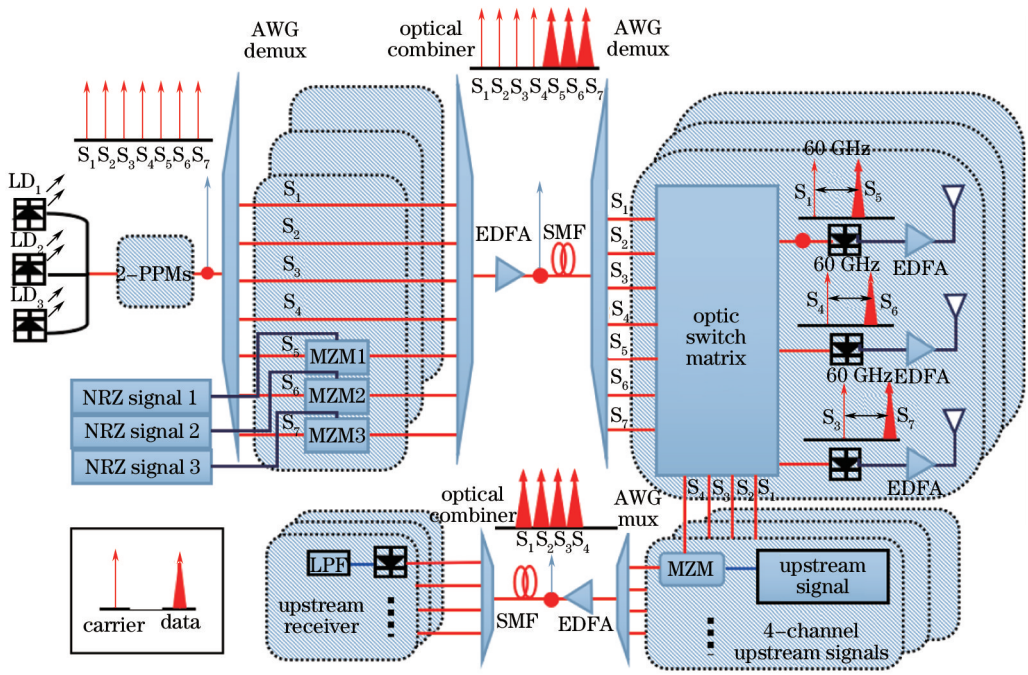


图 7 波分复用光纤无线系统结构图

Fig. 7 Structure diagram of wavelength division multiplexing radio-over-fiber system

的 RF 驱动信号频率为 7.5 GHz, NRZ 的码元速率为 2.5 Gb/s, AWG demux 的频率间隔为 15 GHz, 带宽为 2.5 GHz, 附加损耗为 10 dB, 相邻波长隔离度为 20 dB. EDFA 的增益为 20 dB, SMF 长度为 50 km, 整个光开关矩阵模块的附加损耗为 5 dB, 接收端带通滤波器(BPF)的带宽为 2.5 GHz, 低通滤波器(LPF)带宽为 1.25 GHz, BERT 为误码率测试器。图 8 中 *a*、*b* 和 *c* 各点的光频谱图如图 9(a)、(b)和(c)所示。

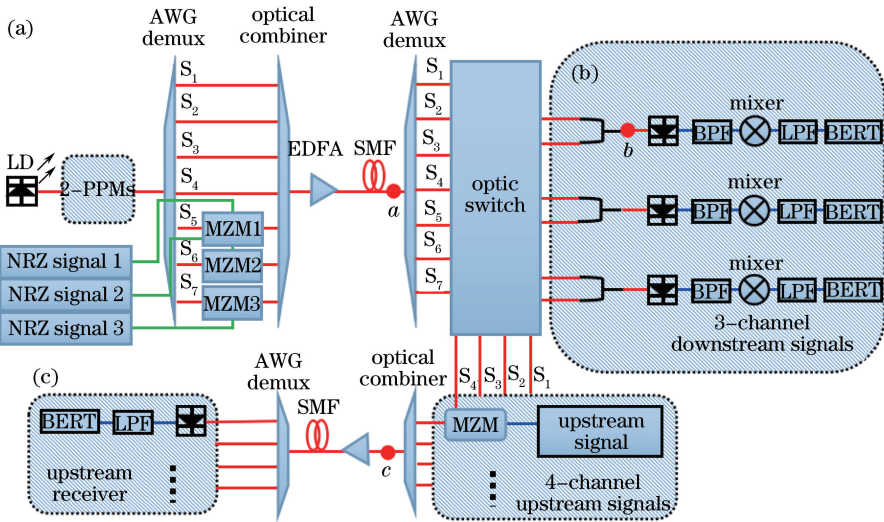


图 8 实验仿真结构图

Fig. 8 Structure of diagram simulation system

图 8 中, *a* 点处 S_5 、 S_6 、 S_7 加载了下行 NRZ 信号, 耦合后与未加载信号的 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 一同经 50 km SMF 传输。由 7×8 数字光开关矩阵对边带进行重新组合后, 在 *b* 点处得到 $[S_1, S_5]$ 边带组, 拍频后可得到 60 GHz 毫米波。 S_1 、 S_2 、 S_3 经 50 : 50 分光器后一部分与 S_5 、 S_6 、 S_7 拍频, 而另一部分与 S_4 一同成为上行信号的载波, 在加载了上行 NRZ 信号后 *c* 点的频谱如图 9(c) 所示。

4.2 系统性能分析

该系统中无论何种组合方式, 最终毫米波都是由一个已加载信号边带和未加载信号边带拍频产生, 如

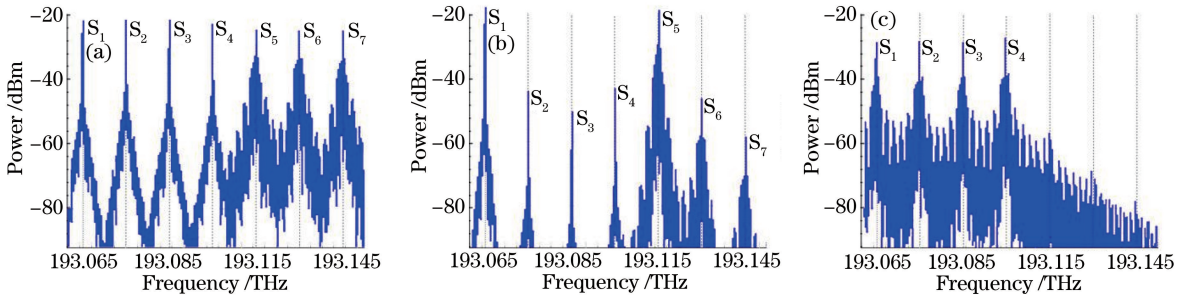


图9 实验仿真结构图中(a) a点、(b) b点、(c) c点对应频谱图

Fig. 9 Spectra of (a) a spot, (b) b spot, (c) c spot in structure of diagram simulation system

图9(b)所示,这种拍频方式与单边带小信号调制相似^[17]。其中只有一个边带加载信号,因光纤色散效应引起的周期性功率衰减和走离引起的码间干扰得到有效抑制,使得传输距离得到延长且传输质量得到提高^[18-19]。

图10为图8系统结构同时传输3路60 GHz毫米波信号的误码率(BER, R_{BE})曲线图和眼图。

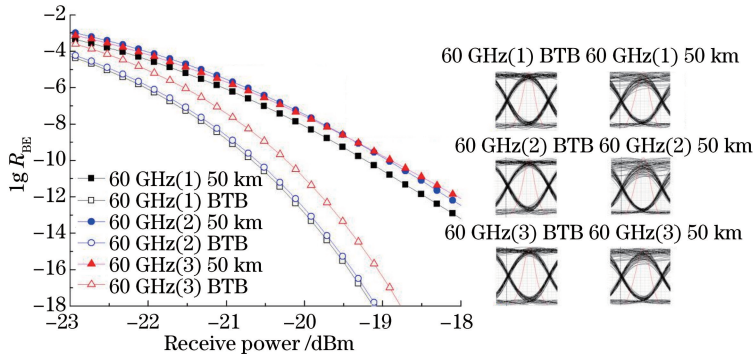


图10 下行链路误码率曲线和眼图

Fig. 10 Downlink link bit error rate curves and eye diagrams

通过对比背对背(BTB)传输和50 km传输的误码率曲线可知,在误码率为 10^{-9} 的情况下,由output4端口输出的60 GHz(1)毫米波,由output3端口输出的60 GHz(2)毫米波和由output2输出的60 GHz(3)毫米波经50 km光纤传输的功率代价分别为1.36 dB、1.58 dB和1.23 dB。由图10还发现,经50 km传输后,各频率毫米波的眼图虽有变窄但依然保持较大幅度的张开。与文献[6]中变相的双边带载波抑制调制(DSB-CS)相比,因为排除了码间干扰问题对传输质量的影响,该系统更适合长距离传输。

表1 各组合方式所生成毫米波信号及对应上行信号进行50 km传输的功率代价

Table 1 Power penalty of MMW signals generated in different situations and upstream signals after 50 km transmission

Situation	Sidebands	Frequency /GHz	Power penalty of downstream signal /dB	Upstream signal carrier	Power penalty of upstream signal /dB
Fig. 4(a)	$[S_1, S_5]$	60(1)	1.36	S_1	1.23
	$[S_2, S_6]$	60(2)	1.58	S_2	1.18
	$[S_3, S_7]$	60(3)	1.23	S_3	1.24
				S_4	1.10
Fig. 4(b)	$[S_3, S_5]$	30	1.21	S_1	1.22
	$[S_2, S_6]$	60	1.71	S_2	1.21
	$[S_1, S_7]$	90	1.61	S_3	1.16
				S_4	1.11
Fig. 4(c)	$[S_3, S_4]$	15	1.32	S_2	1.22
	$[S_2, S_5]$	45	1.55		
	$[S_1, S_6]$	75	1.49	S_3	1.21
	$[S_1, S_7]$	90	1.69		

此外,还对图 4(b)和(c)中的拍频方式所生成毫米波以及各种方式中的多路上行信号进行了误码率分析,结果如表 1 所示。无论上下行信道数量的变化,还是下行毫米波信号频率的变化,都不会对信号的传输功率代价造成太大影响,其功率代价的波动范围为 1.21 dB~1.71 dB。同时上行传输功率代价波动范围为 1.10 dB~1.24 dB,系统体现了良好的抗色散性和均衡性。

5 结 论

提出了一种多路可选频的 WDM-ROF 系统。该系统通过 2-PPMs 结构生成间隔频率为 15 GHz 的 7 边带光信号,并通过本文提出的 7×8 数字光开关矩阵对 7 个边带进行拆分和两两组合,达到同时传输最多 4 路频率可选下行毫米波信号和 2~4 路上行信号的目的。通过分析组合方式还发现,除 2 倍频(15 GHz)、12 倍频(90 GHz)外,同一倍频的毫米波信号可以由多种组合方式拍频产生,并对 7×8 光开关矩阵的频率选择方法作了详细说明。仿真实验中对 2 倍频(15 GHz)、4 倍频(30 GHz)、6 倍频(45 GHz)、8 倍频(60 GHz)、10 倍频(75 GHz)、12 倍频(90 GHz)共 6 种频率的下行毫米波信号和对应的若干路上行信号进行分析,经仿真实验可知,多路下行毫米波信号在误码率为 10^{-9} 情况下经 50 km SMF 传输的功率代价波动范围为 1.21 dB~1.71 dB,多路上行信号功率代价波动范围为 1.10 dB~1.24 dB,体现了良好的均衡性。与其他方法相比,系统体现出更好的抗色散性能,更适用于长距离光纤传输。

参 考 文 献

- Li Guang, Huang Xuguang. A bi-directional radio-over-fiber system based on double-sideband with optical carrier suppression[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5): 1153-1157.
李 广, 黄旭光. 抑光载波双边带 Radio over Fiber 双工通信系统设计[J]. 光子学报, 2009, 38(5): 1153-1157.
- Pan Wu, Lei Da, Li You, *et al.*. Research on WDM-ROF-PON systems for multi-service transmissions[J]. Study on Optical Communications, 2012, 173(5): 20-23.
潘 武, 雷 达, 李 柚, 等. 多业务传输的 WDM-ROF-PON 系统研究[J]. 光通信研究, 2012, 173(5): 20-23.
- Li Rongling, Zhang Junwen, Shao Yufeng, *et al.*. Research of new technologies employed in radio over passive optical network[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 100603.
李荣玲, 张俊文, 邵宇丰, 等. 射频无源光网络中几种新技术的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 100603.
- Kim Hyoungh-Jun, Song Jong-In. Multi-channel photonic frequency upconverter using a single electro-absorption modulator for generating WDM-RoF signals[C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2011: 1-4.
- Aldhaibani A O, Idrus S M, Zulkifli N. 2.5 Gb/s hybrid WDM/TDM PON using radio over fiber technique[C]. IEEE 3rd International Conference on Photonics, 2012: 255-257.
- Cao Zizheng, Yu Jianjun, Zhou Hui, *et al.*. WDM-ROF-PON architecture for flexible wireless and wire-line layout[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(2): 117-121.
- Wang Jing, Cao Zizheng, Zhou Hui, *et al.*. A wavelength division multiplexing radio-over-fiber system with 58 GHz optical orthogonal frequency division multiplexing millimeter-wave signal[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1274-1278.
王 晶, 曹子峥, 周 慧, 等. 承载正交频分复用信号的 58 GHz 光载毫米波波分复用光纤无线通信系统[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1274-1278.
- Johansson L A, Seeds A J. Generation and transmission of millimeter-wave data-modulated optical signals using an optical injection phase-lock loop[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(2): 511-520.
- Xiang Y, Jiang N, Chen C, *et al.*. Wired/wireless access integrated RoF-PON with scalable generation of multi-frequency MMWs enabled by tunable optical frequency comb[J]. Optics Express, 2013, 21(17): 19762-19767.
- Ivan Aldaya, Gabriel Campuzano, Christophe Gosset, *et al.*. Simultaneous generation of WDM PON and RoF signals using a hybrid mode-locked laser[C]. 16th International Conference on Transparent Optical Networks, 2014: 1-4.
- Vidak Vujicic, Prince Anandarajah, Colm Browning, *et al.*. WDM-OFDM-PON based on compatible SSB technique using a mode locked comb source[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(21): 2058-2061.
- Han Yishi, Zheng Zhenyu, Guo Fangwei. Optical high-power millimeter-wave generated by multiple-sidebands[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0805003.
韩一石, 郑振宇, 郭方伟. 基于多边带拍频实现高功率毫米波方法[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0805003.

- 13 Han Yishi, Zheng Zhenyu, Luo Zhixiao, *et al.*. High-power optical millimeter-wave signal generation with tunable frequency multiplication factor[J]. *Optics Communications*, 2015, 335: 53-59.
- 14 Jiang W, Okamoto K, Soares F M, *et al.*. 5 GHz channel spacing InP-based 32-channel arrayed-waveguide grating[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2009: 1-3.
- 15 Liu Yi, Tong Xiaogang, Yu Jinlong, *et al.*. All-optical switching in silicon-on-insulator serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0205006.
刘毅, 仝晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0205006.
- 16 Zheng Chuantao, Luo Qianqian, Sun Changlun, *et al.*. Polymer electro-optic switch using cross-coupling five-serial-coupled microring resonator with ultra-low crosstalk[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(3): 0313001.
郑传涛, 罗倩倩, 孙长轮, 等. 低串扰聚合物交叉耦合串联五环谐振电光开关[J]. *光子学报*, 2014, 43(3): 0313001.
- 17 B Sultana, Khandker M R. Lower bound on number of planes for vertically stacked optical banyan networks with link failures[C]. *10th International Conference on Computer and Information Technology*, 2007: 1-6.
- 18 Shi Peiming. The investigation of high quality mm-wave signal generation without optical filter based on the integrated MZM[D]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications, 2011: 28-31.
史培明. 基于MZ集成调制器无光滤波产生高质量毫米波信号的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011: 28-31.
- 19 Zhu Zihang, Zhao Shanghong, Li Yongjun, *et al.*. A radio-over-fiber system with frequency 12-tupling optical millimeter-wave generation to overcome chromatic dispersion[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics Letters*, 2013, 49(11): 919-922.