

# 基于训练序列进行系统优化的 60 GHz 正交频分复用-光载无线通信系统

邹伟刚 王 鑫 肖江南 曹子峥 陈 林 余建军

(湖南大学信息科学与工程学院微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要** 分析了 60 GHz 正交频分复用-光载无线通信 (OFDM-RoF) 系统中 OFDM 信号经光纤传输后在光电检测时存在的子载波间互拍干扰 (SSBI) 现象。提出使用交叉型训练序列结构的 OFDM 信号来降低 SSBI 的影响。实验证明, 在无色散补偿的情况下, 2.5 Gb/s 交叉型训练序列结构的基带 OFDM 信号在 58 GHz 毫米波系统中经光纤传输 20 km 后, 在误码率为  $10^{-3}$  时, 其功率代价仅为 0.5 dB, 而连续型训练序列结构 OFDM 的功率代价为 2 dB。说明基于交叉型训练序列结构的 OFDM 信号的传输性能在抵抗 SSBI 方面要明显优于连续型训练序列结构 OFDM 信号。

**关键词** 光通信; 光纤无线通信; 正交频分复用; 训练序列; 子载波间互拍干扰

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0505010

## Optimization of 60 GHz Orthogonal Frequency Division Multiplexing Radio-over-Fiber System Based on Training Sequence

Zou Weigang Wang Xin Xiao Jiangnan Cao Zizheng Chen Lin Yu Jianjun

(Key Laboratory of Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education, School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract** There is signal-signal beating interference (SSBI) when the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signal is detected by PIN after transmitting over the fiber in 60 GHz OFDM radio-over-fiber (RoF) system. The interleaved configuration of training sequence of OFDM signal is proposed to decrease the influence of the SSBI. The experimental results show that after the 2.5 Gb/s interleaved OFDM signal transmitting over 20 km single mode fiber in 58 GHz millimeter-wave system, the power penalty of the interleaved OFDM signal is only 0.5 dB at the bit error rate (BER) of  $10^{-3}$  without dispersion compensation. In comparison, the power penalty of the continued OFDM signal under the same conditions is 2 dB. It is demonstrated that the fiber transmission performance of the interleaved OFDM signal is better than the continued OFDM signal in robust tolerance against SSBI.

**Key words** optical communications; radio-over-fiber; orthogonal frequency division multiplexing; training sequence; signal-signal beating interference

**OCIS codes** 060.2330; 060.4510; 060.5625; 060.2360; 060.4080; 060.2310

## 1 引 言

近年来, 由于 60 GHz 高频段毫米波的光载无线通信系统 (RoF) 存在 7 GHz 免费使用的频段间隔, 为下一代超宽带无线接入网提供了最有效的接入途

径, 并逐渐成为研究的重点<sup>[1~3]</sup>。而正交频分复用 (OFDM) 调制技术以其抗窄带干扰能力强、频谱利用率高和抵抗光纤中的色度色散及偏振模色散的容忍度强等特点, 成为目前解决 RoF 系统长距离传输

收稿日期: 2010-11-08; 收到修改稿日期: 2011-03-04

基金项目: 国家自然科学基金 (60977049) 和国家 863 计划 (2009AA01Z220, 2009AA01Z222) 资助课题。

作者简介: 邹伟刚 (1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤无线通信技术和光正交频分复用等方面的研究。

E-mail: zwghnu@gmail.com

导师简介: 陈 林 (1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤无线通信技术、光正交频分复用和光分组交换等方面的研究。E-mail: lililiu@sina.com (通信联系人)

的最佳解决方案<sup>[4~7]</sup>。

目前在 OFDM-RoF 系统中,直接检测光 OFDM 系统由于其接收端只需一个光电转换器、系统复杂度低等优点而受到了广泛的关注和研究<sup>[8~12]</sup>。文献[13]提出在光载波与 OFDM 信号之间增加保护间隔来避免子载波之间互拍干扰(SSBI),该方案最大缺点是频谱利用率低,接收机需要很大的带宽。为减少保护间隔的长度,已有学者做了相关的研究<sup>[14~16]</sup>,但是系统的复杂度和成本也随之提高。现阶段对无保护间隔的直接检测 OFDM 信号的 OFDM-RoF 系统也进行了大量的研究,在这些系统中主要考虑光载波与 OFDM 信号之间的差拍<sup>[17,18]</sup>。由于在光电检测时 SSBI 信号能够干扰有用 OFDM 信号的输出,影响 OFDM 信号在接收端解调的精确性,文献[19]提出利用交织编码技术来克服 SSBI 的影响,提高了系统的传输速率和传输距离,但是由于使用了编码技术提高了系统的冗余度。因此,如何在优化整体系统和结构的同时减少 SSBI 的影响成为研究的重点。

本文理论分析了直接检测 60 GHz OFDM-RoF 系统中 OFDM 信号子载波之间的 SSBI,并提出使

用交叉型训练序列结构的 OFDM 来避免 SSBI 的影响。实验比较了在误码率(BER)为  $10^{-3}$  时两种不同训练序列结构的 OFDM 信号在光纤中传输 20 km 后的功率代价,结果显示,基于交叉型训练序列结构的 OFDM 信号的系统性能受 SSBI 的影响小,比基于连续型训练序列结构的 OFDM 信号实验系统有明显改善。

## 2 理论分析

基于外部调制器的 60 GHz OFDM-RoF 系统如图 1 所示。在中心站(CO)中,设分布式反馈(DFB)激光器输出线宽很窄的连续光波为  $E_{out}(t) = E_c \cos(\omega_c t)$ ,其中  $E_c$  和  $\omega_c$  分别为光载波的幅度和角频率,连续光输入到一个由射频(RF)信号驱动的外部铌酸锂马赫-曾德尔调制器(LN-MZM)。射频信号表达式为  $V_{RF}(t) = V_{RF} \cos(\omega_{RF} t)$ ,其中  $V_{RF}$  和  $\omega_{RF}$  分别为射频信号的幅度与角频率。合理设置调制器的直流偏置电压,使得调制器输出端信号包含中心载波和一阶边带,同时忽略二阶以上的边带,经交叉复用器(IL)滤除中心载波后得到频率间隔为 2 倍于射频信号的光毫米波为<sup>[19,20]</sup>

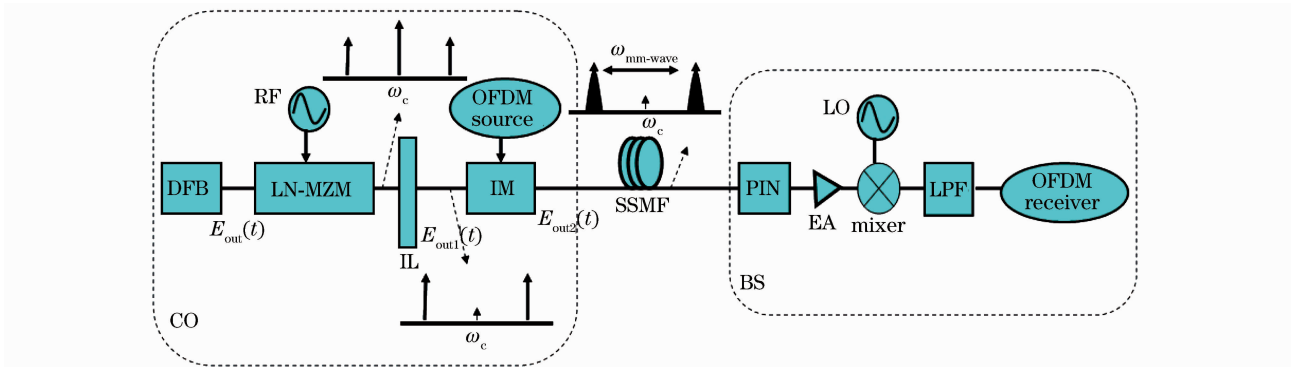


图 1 基于外部调制器的 60 GHz OFDM-RoF 系统原理图

Fig. 1 Principle of 60 GHz OFDM-RoF system based on the external modulator

$$E_{out1}(t) = a_{-1} \cos[(\omega_c - \omega_{RF})t] + a_{+1} \cos[(\omega_c + \omega_{RF})t], \quad (1)$$

式中  $a_{+1}, a_{-1}$  分别为上下一阶边带的幅度系数。设基带 OFDM 数据信号表达式为  $x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} d(n) \times \exp\left(\frac{j2\pi nt}{N}\right)$ ,其中  $t$  为离散时间指数, $N$  为子载波的个数, $d(n)$  为调制到第  $n$  个子载波上的数据符号。调节强度调制器两端的工作电压使其在线性范围内工作,则调制器输出端光信号可表示为

$$E_{out2}(t) = \{a_{-1} \cos[(\omega_c - \omega_{RF})t] + a_{+1} \cos[(\omega_c + \omega_{RF})t]\} \times \left[1 + m \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} d(n) \exp\left(\frac{j2\pi nt}{N}\right)\right], \quad (2)$$

式中  $m$  为强度调制器在线性范围内工作的光调制指数。考虑光纤中色散的影响,设相位偏移常数为  $\beta(\omega)$ ,幅度衰减因子常数为  $r$ ,同时忽略其他非线性效应的影响,光波信号在光纤中传输  $z$  距离后可写成

$$E_{out2}(z, t) = a_{-1} \exp(-rz) \cos[(\omega_c - \omega_{RF})t - \beta(\omega_c - \omega_{RF})z] +$$

$$\begin{aligned}
 & a_{+1} \exp(-rz) \cos[(\omega_c + \omega_{RF})t - \beta(\omega_c + \omega_{RF})z] + \\
 & a_{-1} \exp(-rz) \cos[(\omega_c - \omega_{RF})t - \beta(\omega_c - \omega_{RF})z] + \\
 & a_{+1} \exp(-rz) \cos[(\omega_c + \omega_{RF})t - \beta(\omega_c + \omega_{RF})z]. \quad (3)
 \end{aligned}$$

设  $A_k = a_k \exp(-rz) x[t - (\omega_c + k\omega_{RF})^{-1} \beta(\omega_c + k\omega_{RF})z]$  ( $k = \pm 1$ ),  $B_k = a_k \exp(-rz)$  ( $k = \pm 1$ ), 此光信号经光纤传输到基站 (BS) 后, 经光电检测后输出端的电流为

$$\begin{aligned}
 I(t) = & \mu |E_{\text{out}2}(z, t)|^2 \approx \frac{1}{2} \mu (mA_{-1}B_{-1} + mA_{+1}B_{+1} + m^2 A_{-1}^2 + m^2 A_{+1}^2 + B_{-1}^2 + B_{+1}^2) + \\
 & \frac{1}{2} \mu mA_{-1}B_{-1} \cos[(\omega_c - \omega_{RF})t - 2\beta(\omega_c)z + 2\omega_{RF}\beta'(\omega_c)z - 2\omega_{RF}^2\beta''(\omega_c)z] + \\
 & \frac{1}{2} \mu mA_{+1}B_{+1} \cos[(\omega_c + \omega_{RF})t - 2\beta(\omega_c)z - 2\omega_{RF}\beta'(\omega_c)z - 2\omega_{RF}^2\beta''(\omega_c)z] + \\
 & \frac{1}{2} \mu (A_{-1}B_{+1} + A_{+1}B_{-1} + B_{-1}B_{+1}) \cos\{2\omega_{RF}[t - \beta'(\omega_c)z]\} + \\
 & \frac{1}{2} \mu m^2 A_{-1}A_{+1} \cos\{2\omega_{RF}[t - \beta'(\omega_c)z]\}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中  $\mu$  为 PIN 的响应系数。在 (4) 式中对相位偏移系数  $\beta(\omega_c \pm k\omega_{RF})$  进行了泰勒展开, 即  $\beta(\omega_c \pm k\omega_{RF}) = \beta(\omega_c) \pm k\omega_{RF}\beta'(\omega_c) + \frac{1}{2}k^2\omega_{RF}^2\beta''(\omega_c)$ , 其中  $\beta(\omega_c)$ ,  $\beta'(\omega_c)$ ,  $\beta''(\omega_c)$  分别为相位延时、群延时和一阶色散。

从 (4) 式电流输出表达式可知, 第 1 项为直流 (DC) 分量, 第 2, 3 项为基波分量, 第 4 项与第 5 项分别为毫米波 OFDM 信号 (OFDM\_Signal) 电流分量和 SSBI 分量。对 SSBI 分量进行展开

$$\begin{aligned}
 I_{\text{SSBI}} = & \frac{1}{2} \mu m^2 A_{-1}A_{+1} \cos\{2\omega_{RF}[t - \beta'(\omega_c)z]\} = \\
 & \frac{1}{2} \mu m^2 a_{-1} \exp(-rz) x[t - (\omega_c - \omega_{RF})^{-1} \beta(\omega_c - \omega_{RF})z] \times \\
 & a_{+1} \exp(-rz) x[t - (\omega_c + \omega_{RF})^{-1} \beta(\omega_c + \omega_{RF})z] \times \cos\{2\omega_{RF}[t - \beta'(\omega_c)z]\}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

从 (5) 式可知, 系统中的 OFDM 信号不管是否经过光纤传输都存在 SSBI, 且该 SSBI 是上下两个载波中 OFDM 信号子载波之间互拍形成的, 这说明光 OFDM 信号在光电转换中不仅包括有用的毫米波 OFDM 信号, 还包括两个载波中 OFDM 信号子载

波之间互拍形成的 SSBI。从 (5) 式得知, 该干扰在其频率越低时对信号的干扰越大, 因此光 OFDM 信号经光电检测后 SSBI 集中落入 OFDM 信号的前部, 随着频率的增加, SSBI 逐渐减少。

OFDM 信号在 PIN 端的拍频过程如图 2 所示。

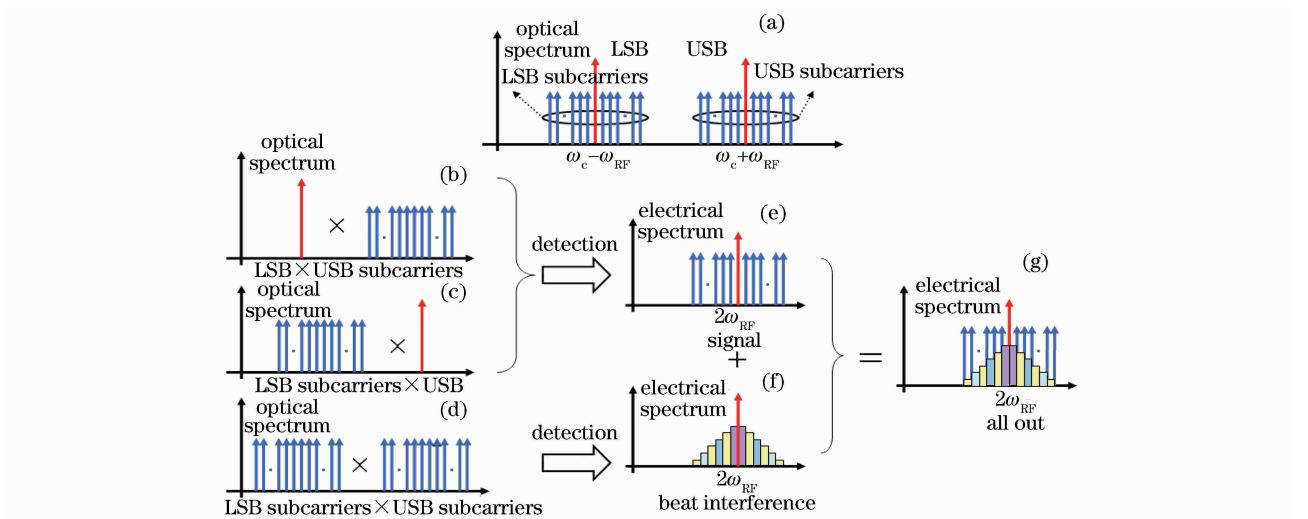


图 2 PIN 中 OFDM 信号的拍频过程  
Fig. 2 Beating process of OFDM in PIN

PIN 输入端光信号的光谱图如图 2(a)所示,包括上下两个一阶载波(USB 和 LSB)及载波上 OFDM 信号,在 PIN 检测时上下两个一阶载波分别与另一个载波上的 OFDM 信号进行拍频[见图 2(b)和(c)],形成的有用的电 OFDM 信号[见图 2(e)],而两个一阶载波上的 OFDM 信号子载波之间拍频如图 2(d)所示,拍频后产生的 SSBI 如图 2(f)所示。该 SSBI 与有用的电 OFDM 信号一起在 PIN 输出端输出[见图 2(g)],然后与本地振荡信号(LO)进行相干解调,经低通滤波器(LPF)后恢复出基带 OFDM 数据信号,再使用离线程序对基带 OFDM 数据信号进行解调接收。

在对光 OFDM 信号进行光电检测时,有用的电 OFDM 信号受到 SSBI 的干扰,而且这种干扰主要集中在低频 OFDM 信号的帧结构前部。已有的 OFDM 信号帧结构的前部主要由一连串的训练序列组成,紧随的是 OFDM 信号数据符号。由于光 OFDM 信号在光纤中传输时是一个慢衰落过程,因此可以利用前部的训练序列对后面的 OFDM 数据部分进行信道估计和时间同步,这样即使后面的 OFDM 数据部分存在 SSBI 的影响也可以完全恢复。图 3(a)为一般的 OFDM 帧结构,其前部的训练序列结构是连续的,紧随训练序列是循环前缀(CP)和 OFDM 数据符号,其中 CP 是用来消除码间干扰和避免因相移而影响子载波的正交性,同时每个 OFDM 数据符号中插入数个间隔相同的导频(pilot),用来跟踪接收信号中训练序列和数据信号的相移,在接收端可以利用训练序列和导频联合对

接收端接收到的电信号进行解调和信道估计。这种帧结构在光信号无光纤传输时能够充分利用训练序列的连续分布特点而无差错恢复数据信号,但在光 OFDM 信号传输一段距离后,光电检测时产生的 SSBI 落入到连续的训练序列结构中破坏了训练序列的完整性,这样在接收端对采样的 OFDM 信号不能实现完整的恢复。因此,基于前面的 OFDM 信号帧结构的特点,提出一种能减少 SSBI 影响的交叉型训练序列结构的 OFDM 信号帧结构,如图 3(b)所示,其中除训练序列结构不同外,其余数据符号和 CP 与前面训练序列为连续结构的 OFDM 信号的帧结构相同。在该帧结构中,训练序列交叉地占有奇数通道而保持偶数通道空白,这样在光电检测时产生的 SSBI 落入到偶数通道上,而对奇数通道上的信息不会产生干扰。这样可以利用奇数通道上的通道信息对整个 OFDM 信号进行信道估计,在信道估计时减少 SSBI 对训练序列的影响,从而提升系统的性能。

### 3 实验装置

图 4(a)为实验系统装置图。实验中 DFB 激光器产生波长为 1542.8 nm 的连续光载波,而 29 GHz RF 信号由 HP Agilent E8257D 模拟信号发生器产生 14.5 GHz 的频率信号经 1×2 倍频器产生。光载波经偏振控制器进入 3 dB 带宽大于 20 GHz,消光比大于 25 dB,半波电压为 7.8 V 的马赫-曾德尔单臂调制器。当调制器的直流偏置电压为 2.9 V 时,从调制器输出端输出信号为双边带调制的信号,其光谱如图 4(b)所示。光信号中包含中心载波和一阶边带。使用一个 50/100 GHz 的交叉复用器滤除中心载波,光信号只剩下上下一阶边带(由于其他高阶边带功率要比一阶边带低 40 dB,因此忽略高阶边带对信号的影响),得到频率间隔为 58 GHz 的光毫米波,其光谱如图 4(c)所示。光毫米波经掺铒光纤放大器(EDFA)进行功率补偿后输入到一个低速的强度调制器(IM)。将处理后的 2.5 Gb/s 基带 OFDM 数据信号加载至光毫米波上,OFDM 数据信号根据前面的帧结构由 256 个子载波组成,其中 192 个子载波传输数据,同时将伪随机码序列按照系统特性进行帧形成,并将符号进行多进制符号映射,在将数据帧映射为符号帧后在每个符号中插入 8 个导频,用来跟踪接收信号的相对相移,剩余 56 个子载波除最中间的子载波作为直流载波被置零外,其余子载波作为频域保护间隔分别置于数据子载波两端,然后经

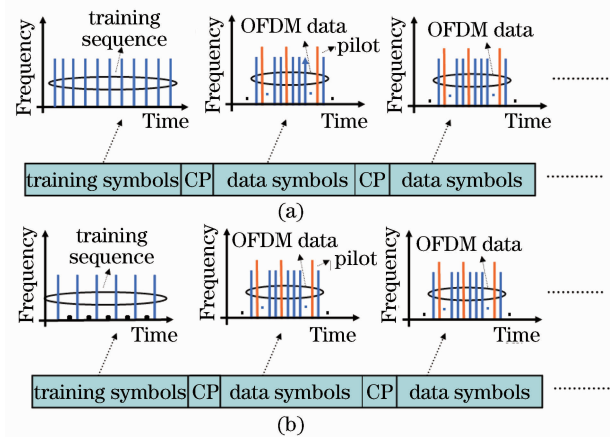


图 3 基于不同训练序列结构的 OFDM 帧结构  
 (a) 连续型训练序列结构, (b) 交叉型训练序列结构  
 Fig.3 Configuration of OFDM frame with different training sequences. (a) continued training sequence, (b) interleaved training sequence

快速傅里叶逆变换(IFFT)形成多正交子载波波形。为克服信号时延,在波形中增加 1/8 的 CP,即将后面 32 个子载波复制到波形前端,同时每个 OFDM 信号帧前插入训练序列符号用来进行时间同步和信道估计。最后将波形导入到采样速率为 4.0 GS/s 的 Tektronix 任意波形发生器(AWG)产生基带 OFDM 数据信号。OFDM 信号强度调制到光毫米波上后,其光谱如图 4(d)所示。携带 OFDM 信号的 58 GHz 光毫米波在经过光纤链路之前采用一个 EDFA 实现功率放大,使其入纤功率为 8.6 dBm,标准单模光纤(SSMF)的损耗为

0.19 dB/km,色散系数为  $17 \text{ nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,OFDM 光毫米波经 SSMF 传输到光接收机单元,其光谱如图 4(e)所示。在光接收机中,纯净的光毫米波通过 3 dB 带宽为 60 GHz 的高速 PIN 变成电毫米波,再经 3 dB 带宽为 10 GHz,中心频率为 60 GHz 的电放大器进行功率放大后与 58 GHz 的本地振荡信号(LO)混频,经 LPF 后恢复出基带 OFDM 数据信号。该基带 OFDM 数据信号被送往带宽为 8 GHz,采样速率为 5 GS/s 的 Tektronix 实时数字滤波器中采样,采样后的数据处理和恢复在 Matlab 接收程序中离线完成。

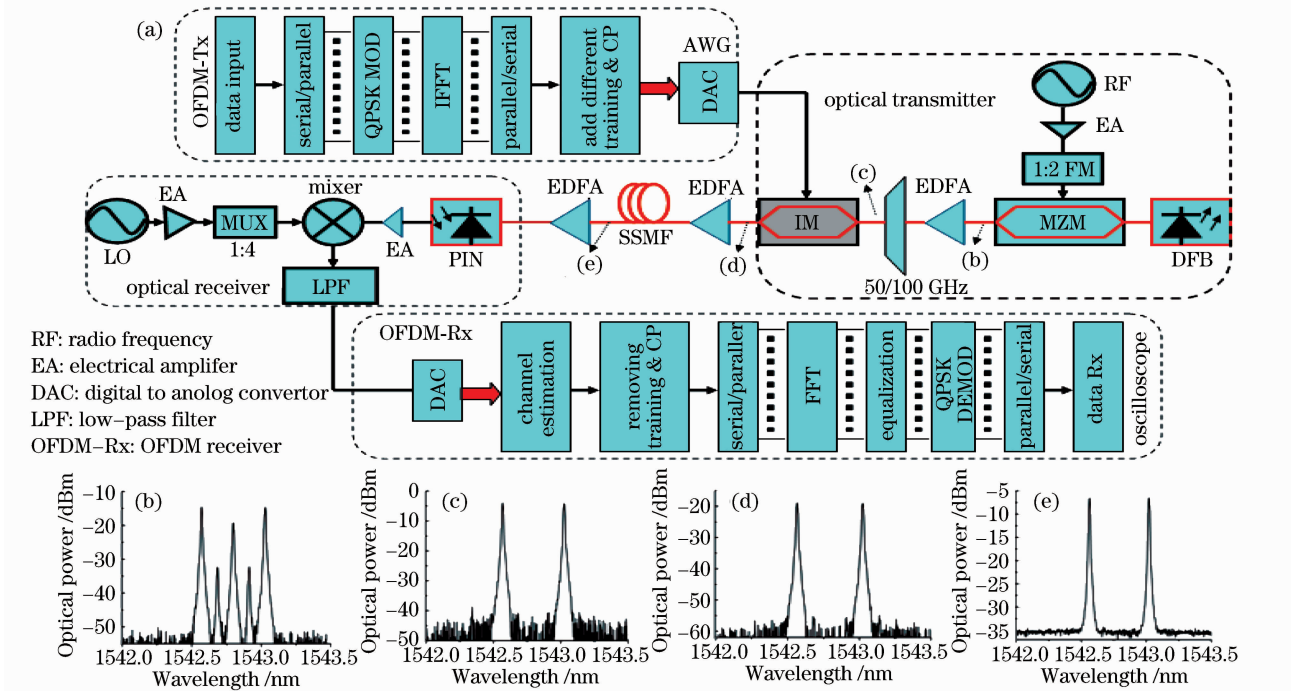


图 4 基于不同训练序列结构的 OFDM 信号的 60 GHz OFDM-RoF 系统实验装置图及光谱图。(a) 实验装置图,(b) 双边带调制后的光谱,(c) 经交叉复用器滤除中心载波后的光谱,(d) OFDM 信号强度调制后的光谱,(e) 经 20 km 光纤传输后的双边带信号光谱

Fig. 4 Experimental setup and optical spectrum for the 60 GHz OFDM-RoF system with different configurations of the training sequence of OFDM signal. (a) experimental setup, (b) optical spectrum after double sideband modulation, (c) optical spectrum after the central carrier is filtered out by interleaver, (d) optical spectrum of the OFDM after intensity modulation, (e) optical spectrum of double sideband signals after 20 km fiber transmission

#### 4 实验结果分析

实验测得两种不同训练序列结构的 OFDM 信号在 60 GHz OFDM-RoF 系统中传输 20 km 后的星座图,如图 5 所示。由于连续型 OFDM 信号中训练序列结构是连续的,在接收端解调和信道估计时能够利用各个信道上的信息进行信道估计,其性能比交叉型信道估计的效果好,因此在图 5(a)中连续型 OFDM 信号在背靠背(B-T-B)时解调的星座图比图

5(b)中交叉型 OFDM 信号的星座图好。但在经 20 km 单模光纤传输后,由于连续型 OFDM 信号在光纤传输后在 PIN 端受到 SSBI 的影响大,交叉型 OFDM 信号的接收信号星座图要比连续型 OFDM 信号更为紧凑、清晰。

实验还测得 2 个 OFDM 基带信号在光纤中传输 20 km 后各个功率点的误码率曲线,如图 6 所示。在背靠背传输中,连续型 OFDM 信号的误码率总体

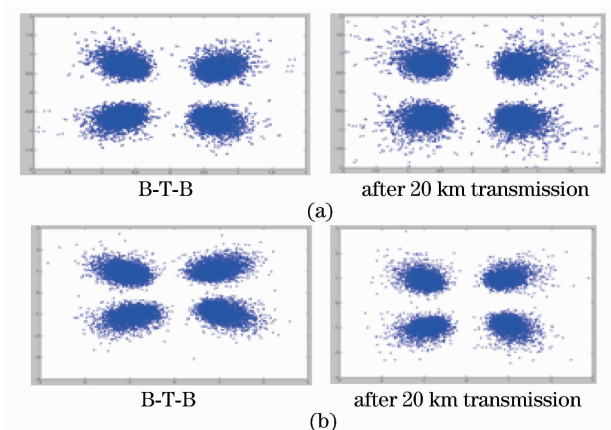


图 5 OFDM信号背靠背和传输 20 km 后的接收星座图。  
(a) 连续型 OFDM 信号星座图, (b) 交叉型 OFDM 信号星座图

Fig. 5 Constellation figures for OFDM signal after B-T-B and 20 km transmission over fiber for (a) continued OFDM signal and (b) interleaved OFDM signal

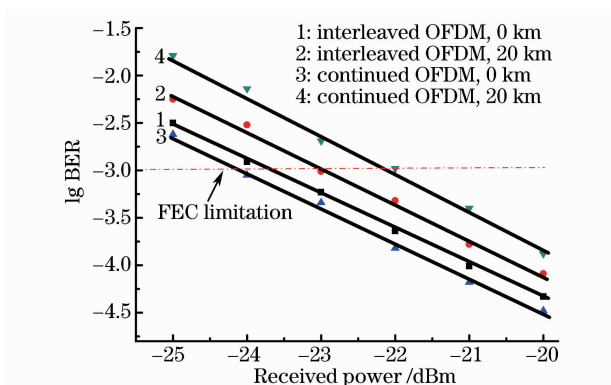


图 6 不同训练序列结构的 OFDM 信号误码率曲线  
Fig. 6 BER curves for OFDM signals with different training sequences

比交叉型 OFDM 信号低 0.3 dB,但是对于交叉型训练序列 OFDM 信号,在无任何色散补偿、误码率为  $10^{-3}$  条件下,在光纤中传输 20 km 后功率代价约为 0.5 dB,而连续型 OFDM 信号的功率代价为 2 dB。这是因为光 OFDM 信号经光纤传输后在 PIN 端检测时存在 SSBI 的干扰,交叉型 OFDM 信号能够使 SSBI 落入到空白的偶数通道的序列结构中,在解调时利用奇数通道上的信息对信号进行信道估计;而对于连续型 OFDM 信号,SSBI 对所有训练序列通道都存在干扰,影响训练序列和导频在解调时进行信道估计的精确性。

## 5 结 论

对 60 GHz OFDM-RoF 系统中光 OFDM 信号

经光纤传输后在 PIN 端检测时存在 SSBI 干扰的情况进行了理论分析和实验研究。提出使用交叉型训练序列结构 OFDM 信号比连续型训练序列结构能更好地减少 SSBI 对 OFDM 信号的影响。实验结果表明,在无任何色散补偿和误码率为  $10^{-3}$  的条件下,在光纤中传输 20 km 后,2.5 Gb/s 交叉型 OFDM 信号比连续型 OFDM 信号功率代价低了 1.5 dB,星座图更为紧凑。利用交叉型训练序列结构的 OFDM 信号在光纤中传输时,避免了 OFDM 信号子载波之间的干扰,一定程度上延长了光纤的传输距离,可以为信号的远距离传输提供一种技术解决方案。

## 参 考 文 献

- 1 Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):481~488  
方祖捷,叶青,刘峰等.毫米波副载波光纤通信技术的研究进展[J].中国激光,2006, **33**(4):481~488
- 2 Chen Lin, Shao Yufeng, Lei Xiaoyan *et al.*. A novel radio-over-fiber system with wavelength reuse for upstream data connection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(6):387~389
- 3 Dong Ze, Cao Zizheng, Chen Lin *et al.*. Experimental research on a radio-over-fiber system based on 60 GHz millimeter-wave [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4):1018~1021  
董泽,曹子峥,陈林等.基于 60 GHz 光毫米波的光纤无线传输系统实验研究[J].中国激光,2010, **37**(4):1018~1021
- 4 Jean Armstrong. OFDM for optical communications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3):189~204
- 5 Chen Lin, Yu Jianjun, Wen Shuangchun. A novel scheme for seamless integration of ROF with centralized lightwave OFDM-WDM-PON system [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(14):2786~2791
- 6 Wang Wenpei, Chen Lin, Dong Ze *et al.*. Performance comparison between on-off keying and orthogonal frequency division multiplexing signals in 40 GHz radio-over-fiber systems [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2):465~470  
王文沛,陈林,董泽等.40 GHz 光纤无线通信系统中开关键控与正交频分复用信号传输性能的比较[J].中国激光,2010, **37**(2):465~470
- 7 Cao Zizheng, Yu Jianjun, Zhou Hui *et al.*. WDM-RoF-PON architecture for flexible wireless and wire-line layout [J]. *J. Opt. Commun. Netw.*, 2010, **2**(2):117~121
- 8 Chen Lin, Cao Zizheng, Dong Ze *et al.*. Experimental investigation of direct-detection optical orthogonal frequency-division multiplexing transmission system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3):554~557  
陈林,曹子峥,董泽等.直接检测的光正交频分复用信号光纤传输系统实验研究[J].中国激光,2009, **36**(3):554~557
- 9 Cao Zizheng, Dong Ze, Lu Jia *et al.*. Optical OFDM signal generation by optical phase modulator and its application in ROF system [C]. ECOC, 2009, Paper 2.4.4
- 10 Dong Ze, Cao Zizheng, Lu Jia *et al.*. Transmission performance of optical OFDM signals with low peak-to-average power ratio by a phase modulator [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(21):4194~4197
- 11 Zhang Yimin, Chen Lin, Cao Zizheng *et al.*. Experimental research about a full-duplex OFDM-ROF system based on intensity modulator

- [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7):1744~1749  
 张益民, 陈林, 曹子峥等. 基于强度调制器的全双工 OFDM-ROF 系统实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7):1744~1749
- 12 Yu Jianjun, Hu Junqiang, Qian Dayou *et al.*. Transmission of microwave-photonics generated 16 Gbit/s super broadband OFDM signals in radio-over-fiber system [C]. OFC/NFOEC, 2008, Paper OThP2
- 13 Arthur Jameslowery, Jean Armstrong. Orthogonal-frequency-division multiplexing for dispersion compensation of long-haul optical systems [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(6):2079~2084
- 14 Peng Weiren, Wu Xiaoxia, Vahid R. Arbab *et al.*. Theoretical and experimental investigations of direct-detected RF-tone-assisted optical OFDM systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(10):1332~1339
- 15 Zhenbo Xu, Rongqing Hui. Dual band OOFDM system based on tandem single sideband modulation transmitter [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(16):13479~13486
- 16 Matthias Schuster, Sebastian Randel, Christian Alexander Bunge *et al.*. Spectrally efficient compatible single-sideband modulation for OFDM transmission with direct detection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(9):670~672
- 17 Jia Zhensheng, Yu Jianjun, Hsueh Yuting *et al.*. Demonstration of a symmetric bidirectional 60 GHz radio-over-fiber transport system at 2.5 Gb/s over a single 25 km SMF 28 [C]. ECOC, 2008, Paper Tu.3.F.5
- 18 Chun Ting Lin, Jyehong Chen, Po-Tsung Shih *et al.*. Ultra high data rate 60 GHz radio over fiber systems employing optical frequency multiplication and OFDM formats [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(16):2296~2306
- 19 Cao Zizheng, Yu Jianjun, Xia Minmin *et al.*. Reduction of intersubcarrier interference and frequency selective fading in OFDM-ROF systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(16):2423~2429
- 20 Ma Jianxin, Yu Jianjun, Yu Chongxiu *et al.*. Fiber dispersion influence on transmission of the optical millimeter-waves generated using LN-MZM intensity modulation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(11):3244~3256

## 光子晶体光纤振荡器直接输出 10 W 飞秒激光

天津大学超快激光研究室利用非线性偏振旋转锁模实现了大模场面积光子晶体光纤的高功率输出,该振荡级在 49 MHz 的重复频率下获得了平均功率 10 W 的稳定锁模输出。

激光器使用环形腔结构,利用 2.2 m 长的掺 Yb<sup>3+</sup> 大模场面积光子晶体光纤作为增益介质,纤芯单模场直径为 30 μm,数值孔径为 0.03。光纤内包层直径为 170 μm,数值孔径约为 0.62,在 976 nm 的吸收系数为 13 dB/m。利用波长为 976 nm 的大功率激光二极管作为抽运源,抽运光通过纤芯直径为 200 μm,数值孔径为 0.22 的尾纤输出。为了保证稳定的锁模运转,光纤端面均被打磨成 8° 以避免光纤端面反馈形成的自激振荡。隔离器(40 dB)前放置滤波带宽 6 nm 的干涉型滤光片提供耗散功

能,可以控制腔内脉冲动力学过程。光纤中的非线性偏振演化通过波片和偏振分束器转化成为振幅的调制作用,基于以上两种作用,激光器实现了稳定的锁模运转。激光器内没有使用任何色散补偿元件,工作在全正色散锁模域。在抽运功率为 28 W 时,激光器输出的平均功率达到 10 W,单脉冲能量为 202 nJ。在腔外利用 1200 line/mm 的透射光栅对输出的脉冲进行了压缩,通过调整光栅对间距,得到最短脉冲宽度为 99 fs,时间带宽积为 0.36,是理论变换极限的 1.15 倍,压缩后的自相关曲线如图 1(a)所示。输出脉冲的光谱如图 1(b)所示。透射式光栅对压缩效率为 72%,压缩后输出功率为 7.2 W,对应单脉冲能量 147 nJ。

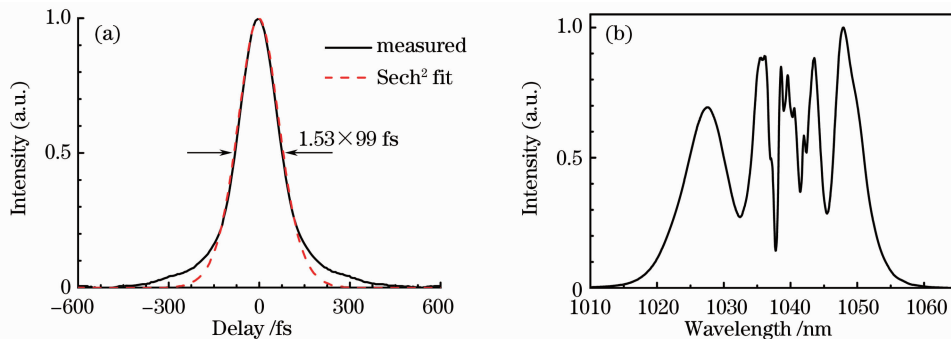


图 1 激光器输出脉冲被压缩后自相关曲线(a)及对应的输出光谱(b)

Fig. 1 (a) Autocorrelation trace and (b) corresponding spectrum of laser pulse after compression

张大鹏 胡明列\* 谢辰 柴路 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

\* 通信联系人。E-mail: huminglie@tju.edu.cn