

基于级联变系数训练序列和预增强技术的 直接检测光 OFDM 系统实验研究

吴巍^{1,2}, 肖江南^{1,2}, 陈明^{1,2}, 余建军^{1,2}, 陈林^{1,2}

(1. 湖南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要: 分析了直接检测光 OFDM(DDO-OFDM)传输系统中由数模转换器和光纤链路中的光纤色散所致的 OFDM 信号高频衰减现象, 以及经光纤传输后在光电检测时存在的子载波间互拍干扰现象。提出使用级联变系数训练序列和预增强结构的光 OFDM(O-OFDM)信号来降低传输系统所受到的影响。理论分析和实验验证表明, 级联变系数训练序列和预增强结构的基带 OFDM 信号在 DDO-OFDM 传输系统中, 接收灵敏度比常规的交叉型训练序列结构的 OFDM 信号要高。说明基于级联变系数训练序列和预增强结构的 O-OFDM 信号的传输性能在抵抗子载波间互拍干扰(SSMI)和频率选择性衰减(FF)方面要优于常规的交叉型训练序列结构的 O-OFDM 信号。

关键词: 光正交频分复用; 变系数训练序列; 预增强; 子载波间互拍干扰; 频率选择性衰减; 光传输

中图分类号: TN929.9

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2013)12-0149-09

Experimental research on a direct-detection optical OFDM system based on cascaded variable coefficient training sequences and pre-emphasis technique

WU Wei^{1,2}, XIAO Jiang-nan^{1,2}, CHEN Ming^{1,2}, YU Jian-jun^{1,2}, CHEN Lin^{1,2}

(1. School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Frequency selective fading (FF) caused by digital to analog converter and optical fiber dispersion in optical fiber link was analysed, and signal-signal mixing interference (SSMI) when the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signal was detected by PIN after transmitting over the fiber in direct-detection optical OFDM system. The cascaded variable coefficient training sequences and pre-emphasized configuration of O-OFDM signal were proposed to decrease the influence of the SSMI and FF. The theoretical analysis and experimental results show that the receiving sensitivity of the cascaded variable coefficient training sequences and pre-emphasized configuration of OFDM signal is higher than the interleaved configuration of training sequence of OFDM signal in DDO-OFDM system. It is demonstrated that the fiber transmission performance of the cascaded variable coefficient training sequences and pre-emphasized configuration of O-OFDM signal is better than the interleaved configuration of training sequence of OFDM signal in robust tolerance against SSMI and FF.

Key words: optical orthogonal frequency division multiplexing(O-OFDM); variable coefficient training sequence; pre-emphasis technique; subcarrier-subcarrier mixing interference(SSMI); frequency selective fading(FF); optical transmission

收稿日期: 2012-09-14; 修回日期: 2013-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60977049); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2011AA010203); 湖南省自然科学基金资助项目(12JJ3070)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(60977049); The High Technology Research and Development Program of China(863 Program) (2011AA010203); The Natural Science Foundation of Hunan Province (12JJ3070)

1 引言

随着通信技术的快速发展,人们对通信质量的要求也越来越高,如何在有限的带宽下实现信息的高速率、大容量以及高质量的传输引起了人们的广泛关注。光正交频分复用(O-OFDM, optical orthogonal frequency division multiplexing)技术作为一种频谱利用率高、对光纤色散及偏振模色散(PMD, polarization mode dispersion)容忍度强的调制技术而成为研究热点^[1,2],相关的O-OFDM传输系统相继被提出和研究^[3~7]。其中,直接检测光OFDM(DDO-OFDM, direct-detection optical OFDM)系统具有结构简单、稳定性好及成本低等优势,因而得到了广泛的研究与应用^[8~10]。

在DDO-OFDM传输系统中,频率选择性衰减(FF, frequency selective fading)和子载波间互拍干扰(SSMI, subcarrier-subcarrier mixing interference)给系统的传输带来了很大的影响。为了减小由此二者带来的性能损耗,一些新型的方法得以提出和研究。文献[11]提出的无保护间隔DDO-OFDM传输系统结合编码和交织来减少FF和SSMI带来的误码。文献[12~14]针对信道特性的非平坦性,在发送端及时了解信道信息的情况下,根据瞬时信道特性分别采用自适应比特功率分配、自适应的LDPC编码技术和自适应比特分配调制技术来减小光纤传输的影响,从而提高传输性能。文献[15]提出改变光滤波器的结构来提高接收灵敏度。文献[16]提出了分配足够的保护频带来使SSMI和OFDM子载波项的射频频谱不产生重叠的方法。虽然这些技术提高了传输系统的性能,但是是以增加算法复杂度、OFDM调制复杂度、系统硬件成本或降低信号频带利用率等为代价。

本文在理论上分析了DDO-OFDM系统受干扰的因素,主要包括子载波间互拍干扰和频率选择性衰减,提出采用级联变系数训练序列和预增强的OFDM信号来补偿由SSMI、FF和其他非线性效应带来的系统性能衰减。训练序列使用两级级联变系数训练序列,同时将OFDM信号的不同子载波进行不同程度的预增强,而各子载波的预增强系数是依据信号在光链路传输系统中受到的衰落而确定的。通过实验对比了传输速率为5 Gbit/s的级联变系数训练序列和预增强技术的O-OFDM信号与常规交叉型训练序列结构的O-OFDM信号在DDO-OFDM

系统中传输100 km单模光纤(SMF, single-mode fiber)后的功率代价,结果显示基于级联变系数训练序列和预增强技术O-OFDM信号的系统性能明显优于基于常规交叉型训练结构O-OFDM系统。说明级联变系数训练序列和预增强的O-OFDM系统可以减少SSMI和FF的影响,提高光传输系统中的传输效率和接收机的灵敏度,同时基于级联变系数训练序列和预增强技术的O-OFDM传输系统的算法和系统复杂度也不很高,且不需要及时反馈信道传输特性,适合于光传输系统的实时处理。

2 频率选择性衰减和子载波间互拍干扰分析

假设激光器产生稳定的频率为 w_0 的单色连续光波,表示为 $C(t) = A_0 \cos(w_0 t)$, A_0 为激光载波的幅度, w_0 为光载波的角频率。

数字OFDM信号经过D/A转换为电模拟OFDM信号,如式(1)所示。

$$S(t) = \sum_{k=1}^N (a_k \cos kOt + b_k \sin kOt) \quad (1)$$

其中, N 为子载波数, a_k 和 b_k 分别为第 k 个子载波信号的同相和正交分量, O 为子载波间的频率间隔, kO 表示第 k 个子载波的频率。

将式(1)表示的电OFDM信号调制到光波上生成基带光OFDM信号,其表示为

$$E_{\text{out}}(t) = A_0 \cos(w_0 t) \left[1 + g \sum_{k=1}^N (a_k \cos kOt + b_k \sin kOt) \right] \quad (2)$$

其中, g 为光强度调制器在线性范围内的调制系数。

O-OFDM信号经光纤传输时,会受光纤色度色散及偏振模色散的影响,从而产生频率、相位偏移和幅度衰减。O-OFDM信号经光纤传输 z km后,接收端接收到的信号如式(3)所示。

$$E_{\text{out}}(t) = A_0 g Att(z) \cdot \sum_{k=1}^N \cos(w_0 t - \frac{b_1 + b_2}{2} z) \cdot B_k + A_0 Att(z) \cos(w_0 t - b_3 z) \quad (3)$$

其中, $B_k = a_k \cos(kOt - \frac{b_1 - b_2}{2} z) + b_k \sin(kOt - \frac{b_1 - b_2}{2} z)$, $b_1 = b(w_0 + kO)$, $b_2 = b(w_0 - kO)$, $b_3 = b(w_0)$,其中, $b(w)$ 为光纤传播常数, $Att(z)$ 为其幅度衰减系数。

在 DDO-OFDM 接收端，经过光电检测器把 OFDM 光信号转换为电信号，其光电流可以表示为

$$I \propto |E_{\text{out}}(t)|^2 = \left(A_0 g \text{Att}(z) \sum_{k=1}^N \cos(\omega_0 t - \frac{b_1 + b_2}{2} z) \cdot B_k \right)^2 + \left\{ \begin{aligned} & 2g A_0^2 \text{Att}^2(z) \cos(\omega_0 t - b_3 z) \cdot \left(\sum_{k=1}^N \cos(\omega_0 t - \frac{b_1 + b_2}{2} z) \cdot B_k \right) \\ & + A_0^2 \text{Att}^2(z) \cos^2(\omega_0 t - b_3 z) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

将式(4)整理为式(5)的形式，因为平方率的光检测器是一种特殊的包络检测器，它对光频段高频部分的信号不敏感，所以含光载波的分量会被当成直流信号 1 来处理，通过滤波处理后的电 OFDM 信号则能进一步简化为式(6)。

$$I = g^2 A_0^2 \text{Att}^2(z) \left(\sum_{k=1}^N \cos(\omega_0 t - \frac{b_1 + b_2}{2} z) \cdot B_k \right)^2 + g A_0^2 \text{Att}^2(z) \left(\begin{aligned} & \sum_{k=1}^N \cos(2\omega_0 t - \frac{b_1 + b_2 + 2b_3}{2} z) \cdot B_k + \\ & \sum_{k=1}^N \cos(\frac{b_1 + b_2 - 2b_3}{2} z) \cdot B_k \end{aligned} \right) + A_0^2 \text{Att}^2(z) \cos^2(\omega_0 t - b_3 z) \quad (5)$$

$$I = g^2 A_0^2 \text{Att}^2(z) \left(\sum_{k=1}^N B_k \right)^2 + g A_0^2 \text{Att}^2(z) \left(\sum_{k=1}^N B_k + \sum_{k=1}^N \cos(\frac{b_1 + b_2 - 2b_3}{2} z) \cdot B_k \right) + A_0^2 \text{Att}^2(z) = g A_0^2 \text{Att}^2(z) \left(\sum_{k=1}^N \cos(\frac{b_1 + b_2 - 2b_3}{2} z) \cdot B_k \right) + g^2 A_0^2 \text{Att}^2(z) \left(\sum_{k=1}^N B_k \right)^2 + A_0^2 \text{Att}^2(z) (g \sum_{k=1}^N B_k + 1) \quad (6)$$

由式(6)可知，接收信号中包含了第 1 项 OFDM 信号项、第 2 项子载波间互拍干扰项以及第 3 项直流信号项^[17]。

图 1 给出了 OFDM 信号在 DDO-OFDM 系统中传输前后的波形变换情况，其中，图 1(a)为数字基带 OFDM 信号的频谱图，图 1(b)为数字基带 OFDM 信号经过数模转换以及光纤传输后的频谱示意图，图 1(g)为经过光电检测后最后接收到的 OFDM 信号频谱图。

从图 1(a)~图 1(b)的变化过程可以看出，信号的高频子载波处出现了一定程度的衰减。这是因为在

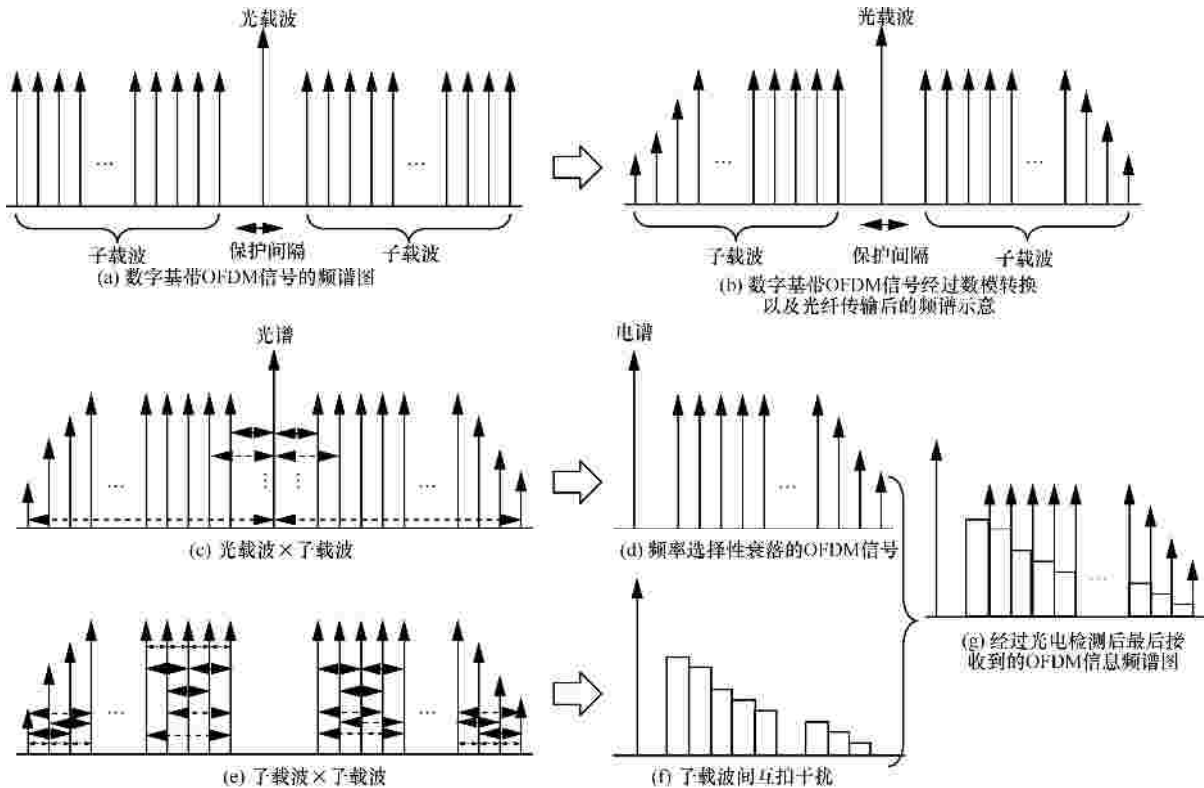


图 1 OFDM 信号在 DDO-OFDM 系统中传输的损耗情况

DDO-OFDM 系统中，数模和模数转换器都包含很多滤波器、放大器和电容电感等非线性器件，而这些滤波器及放大器等的带宽都是有限的。当输入电信号的频率过高时，器件的电容及电感就会产生高频滤波效应，与此同时还会因为发生抖动而引入噪声。根据过采样定理，在采样过程中会同时产生带内信号和带外信号，为了获得带内的 OFDM 信号，则需对采样后的信号通过低通滤波器进行滤波处理，而此时的信号会受到滚降衰减。这是因为实际应用中的低通滤波器的频谱窗口并非标准的矩形，而是一种在其截止频率附近存在一个有限频率滚降的窗口，这样就会使通过滤波后带内的 OFDM 信号中高频部分的子载波信号遭受一定程度的衰减。图 2 给出了 OFDM 信号在电数字信号处理过程中所受到的频率衰减示意图。

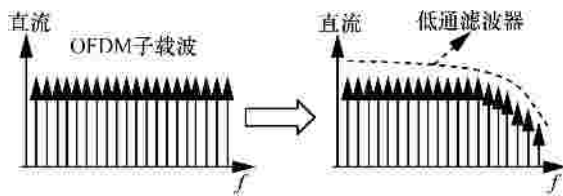


图 2 OFDM 信号受非理想低通滤波器的影响

另外，在经过光纤传输时，光 OFDM 信号不仅会受到光纤偏振模色散和色度色散的影响，而且也会受到由于色散引起的符号延时而导致的频率选择性衰减的影响。因为 OFDM 信号的高频子载波对频率选择性衰减及相位噪声的影响更加敏感，所以高频子载波部分衰减得会更加严重。根据文献[18]对 OFDM 子载波衰减系数的分析可知，OFDM 子载波的衰减系数正比于子载波的阶数，即频率越高衰减越大，其幅度也就越小，这就导致 OFDM 信号高频部分选择性衰减。

经过光纤传输后的光 OFDM 信号在接收端光电检测器中进行光电转换过程如图 1(c)~ 图 1(f)所示。光电检测器输入端光谱如图 1(b)所示。首先输入到 PIN 管中的光信号的光谱图如图 1(b)所示，包括了光载波和调制到该载波上的 OFDM 信号。在进行光电检测时，如图 1(c)所示，光载波与载波上的 OFDM 信号进行拍频，生成的基带有用 OFDM 信号如图 1(d)所示。OFDM 信号子载波之间互拍过程如图 1(e)所示，进行互拍后得到的 SSMI 如图 1(f)所示，子载波间互拍产生的干扰会影响有用信号的接收性能。因此最终输出的光电检测后信号如图

1(g)所示，其由 SSMI 干扰项与有用的电 OFDM 信号组成，然后经低通滤波器恢复出基带 OFDM 数据信号。根据文献[19]对 DDO-OFDM 系统接收端中拍频项的分析可知，距光载波位置越近的 OFDM 信号受到影响的程度也越大。在接收端进行直接检测时，大体上所有的互拍干扰都存在于低频处，这是由于越靠近功率较高的光载波，拍频项的幅值就越大，其中，SSMI 最严重。

3 基于级联变系数训练序列和预增强技术的 DDO-OFDM 基带传输系统

图 3 为采用级联变系数训练序列和预增强技术的 DDO-OFDM 基带传输的系统框图。该系统包括 OFDM 信号产生的模块、光发送模块、光纤链路传输模块、光接收模块及 OFDM 信号接收处理模块。首先对需要传输的数据信息比特进行 OFDM 调制，在进行 IFFT 之前需要对 OFDM 信号完成预增强放大，即将 OFDM 信号的各个子载波的幅度进行不同系数的放大预补偿，然后进行 IFFT 变换、并串转换及添加循环前缀，完成 OFDM 数据符号的调制。最后将用于同步和信道估计的训练序列信息比特经过同样的调制和放大预补偿后加到数据符号之前，经数模转换器(DAC, digital-to-analog converter)转换成模拟的实时电 OFDM 信号。将产生的电 OFDM 信号经过光强度调制器调制到光载波上生成光载基带 OFDM 信号，然后经过标准单模光纤链路传输至光接收端，接收的光信号通过光电检测器(PD, photodiode detection)检测后则可以恢复出电 OFDM 信号，最后通过 OFDM 解调模块对其进行解调均衡等处理，并完成对接收信息误码性能的分析。

根据以上理论分析，为了减小有用 OFDM 信号受 FF 和 SSMI 干扰的影响，此系统提出对 OFDM 帧结构中的训练序列结构进行改进，同时将 OFDM 信号的不同子载波进行预增强放大的方法来提升 O-OFDM 系统的性能。

OFDM 信号结构是在训练序列之后跟随 OFDM 数据符号，其中，导频用来跟踪接收信号的相对相移。因为光 OFDM 信号在光纤链路中的传输是一个慢衰落过程，所以能用前面的训练序列来对紧随后面的 OFDM 数据进行同步与信道估计，这样即使后面的 OFDM 数据存在 SSMI 的影响也可以完全恢复。当 OFDM 帧结构中的训练序列连续占有通

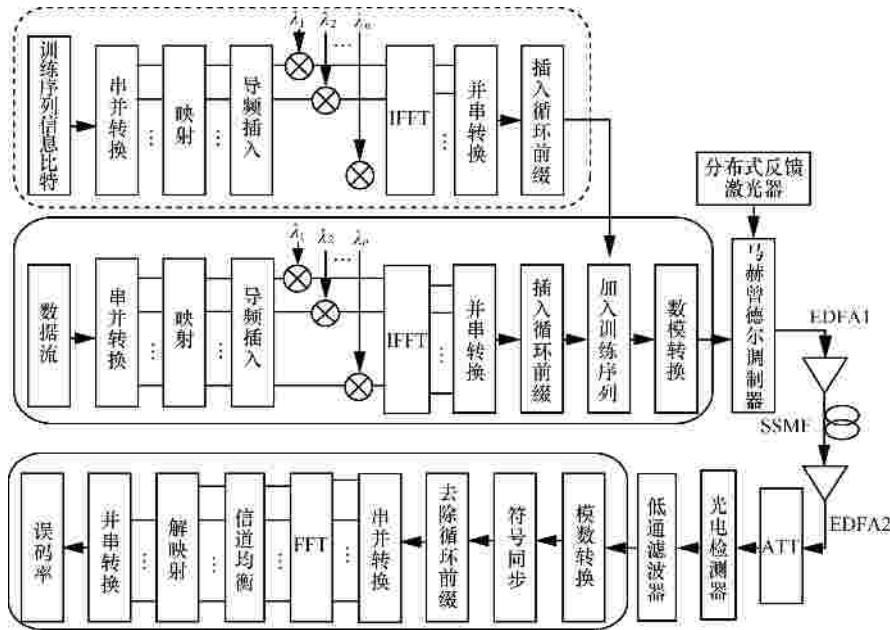


图 3 采用级联变系数训练序列和预增强技术的 DDO-OFDM 基带传输系统

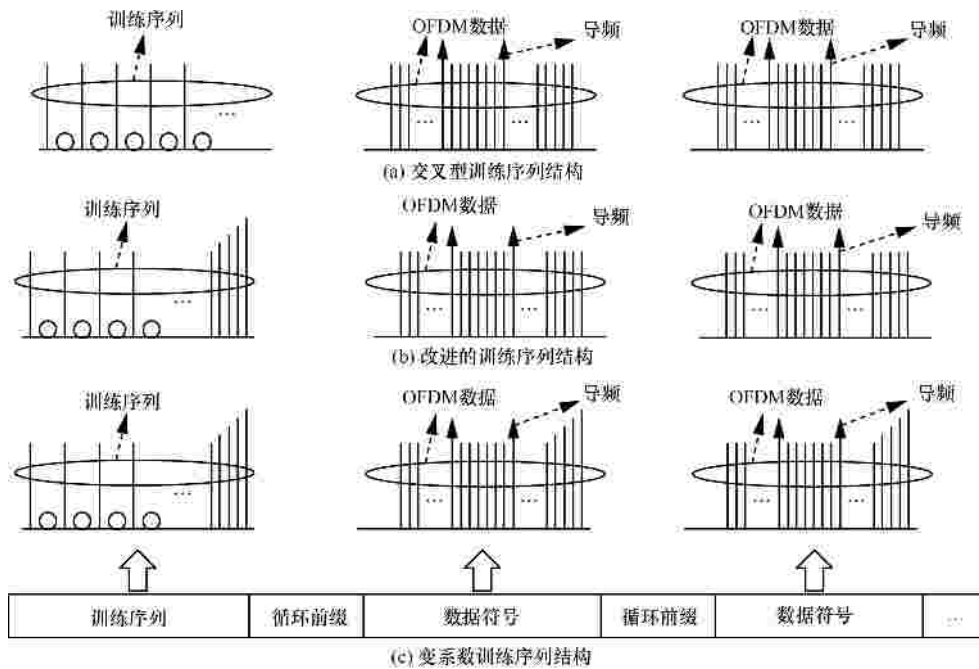


图 4 基于不同训练序列结构的 OFDM 帧结构

道时，在接收端不能有效地恢复接收到的电 OFDM 信号，因为 OFDM 信号在进行直接检测时各个子载波会进行子载波互拍，生成的 SSMI 会影响训练序列的信道信息，从而影响接收性能。

而交叉训练序列结构中训练序列是交叉占有奇数通道而保持偶数位为空白，如图 4(a)所示。由文献[20]可知，在接收端，光电检测后最终光电流包含的二阶非线性项即子载波互拍干扰可以表示为

$$I_{SSMI} = \sum_{k_1=-\frac{1}{2}N_{sc}+1}^{\frac{1}{2}N_{sc}} \sum_{k_2=-\frac{1}{2}N_{sc}+1}^{\frac{1}{2}N_{sc}} c_{k_2}^* c_{k_1} e^{i2p(f_{k_1}-f_{k_2})t} \quad (7)$$

其中， c_k 和 f_k 分别表示第 k 个子载波的 OFDM 信息符号和频率，因为改进训练序列的低频部分是奇偶交叉分布的信息，从式(7)可以得出，当 k_1 和 k_2 中有一个为偶数或者均为偶数时， $c_{k_2}^* c_{k_1} = 0$ ，表示子载波互拍没产生干扰信息；而当 k_1 和 k_2 均为奇数时，

令 Δf 为第一个子载波 k_1 的频率, 同时 Δf 也表示两子载波间的频率间隔, 则 $3\Delta f$ 为第 3 个子载波 k_2 的频率, 两者互拍产生的干扰信息 $2\Delta f$ 会落到第 2 个子载波的位置上, 即会落入信息为空白的偶数位上, 避免了对奇数位上的信息产生干扰。这样在接收端解调的过程中可以使用奇数位上的训练序列信息来对信道进行估计, 产生的 SSMI 会落在偶数通道上, 减小了 SSMI 对训练序列结构的干扰。

由图 1(f)可以看出, SSMI 呈现出倒三角的分布趋势, 即低频处 SSMI 比较严重, 而随着频率的增加, SSMI 的影响也越来越小。这是因为任意两间隔为 $2\Delta f$ 的奇数位上的子载波进行互拍, 产生的干扰信息 $2\Delta f$ 均落在第 2 个子载波的位置上; 而任意两间隔为 $4\Delta f$ 的奇数位上的子载波进行互拍, 产生的干扰信息 $4\Delta f$ 均落在第 4 个子载波的位置上。又因为间隔为 $2\Delta f$ 的奇数位上的子载波比间隔为 $4\Delta f$ 的奇数位上的子载波要多, 依次类推 $6\Delta f$ 、 $8\Delta f$ 等, 则最终的 SSMI 干扰项呈现倒三角形形式分布。FF 则表现在高频部分, 其低频部分基本上不受影响。所以权衡考虑到两者的影响, 在交叉训练序列的基础上对 OFDM 信号帧结构进行改进, 如图 4(b)所示。改进的训练序列结构中, 在受 SSMI 影响较大的低频处奇偶交叉分布一些训练序列信息, 在受 FF 影响严重的高频子载波处多分配一些训练序列信息即占有所有通道。因为高频子载波受 SSMI 影响不大, 所以使信息占有高频部分的所有通道就能有更多的信息用于信道估计, 可以提高信道估计的精确度, 而最后通过插值的方式恢复出原信号为 0 的子信道, 从而完成整个信道的估计, 这样刚好就可以规避由于 SSMI 对 OFDM 信号解调的影响。

另外, 当 2 个长训练序列符号内容一样时, 可以取两者的平均以改进信道估计的质量, 这是因为 2 个统计独立的噪声取样之和除 2 之后, 其变化量相当于单个噪声取样变化量的一半^[21]。所以考虑用 2 个训练序列级联的方法来进行信道估计。基于级联训练序列的频域信道估计与均衡方法如下。

$$S_{TS} = (S_{1TS} + S_{2TS})/2 \quad (8)$$

$$\bar{H} = S_{TS}/T_{TS} \quad (9)$$

$$\bar{R} = R/\bar{H} \quad (10)$$

其中, S_{1TS} 和 S_{2TS} 是接收端接收到的第 1 个和第 2 个训练序列符号, T_{TS} 为发送端标准的训练序列, S_{TS}

是 2 个训练序列的平均, \bar{H} 是训练序列处信道频率响应的估计值, R 是接收到的 OFDM 数据符号, \bar{R} 则为信道均衡处理后的 OFDM 符号。利用此类结构的训练序列得到的子信道传输函数是整个信道传输函数的抽样值, 根据采样定理, 通过内插滤波的方法就能得到整个信道的传输函数。本文所采用的是样条插值算法, 其为采用一种称为样条的特殊分段多项式来插值的。三次平滑样条插值通过调节平滑参数来控制插值函数的平滑程度, 在得出训练序列处的信道频率响应后, 奇偶交叉的低频部分需要根据已知点通过三次平滑样条插值来得到低频处所有训练序列的信道频率响应, 然后与高频部分一起来产生很平滑且连续的拟合曲线, 从而就得到了整个信道的传输函数。

为了有效地补偿 OFDM 信号在数字信号处理及光纤传输过程中频率选择衰减所带来的性能损伤, 在改进训练序列的基础上, 整个训练序列从低频到高频部分的每个子载波将分别对应不同的系数。与此同时, 在对 OFDM 进行调制的过程中, 每个 OFDM 数据子载波信号的幅度都将进行不同程度的放大, 如图 4(c)所示。假设第 k 个子载波的预放大系数是 l_k , 其值是通过估算各个不同子载波在整个光纤链路传输中受到的损伤所得出来的, 可表示为

$$l_k = f\left(c_k, \cos\left[\frac{pDLl^2(kf_0)^2}{c}\right]\right) \quad (11)$$

其中, c_k 为 OFDM 信号的第 k 个子载波衰减系数的一个近似估算值。当光纤色散、OFDM 信号的带宽及光纤传输长度为已知值时, 就可以估算出 l_k , 从而可以补偿 OFDM 信号所受到的衰减。因此通过预增强的电 OFDM 信号可以表示为

$$S(t) = \sum_{k=1}^N l_k (a_k \cos kOt + b_k \sin kOt) \quad (12)$$

经过 z km 的 SSMF 传输后, 在接收端进行检测所得到的 OFDM 信号的光电流可以表示为

$$I = g A_o^2 A t t^2(z) \left(\sum_{k=1}^N l_k \cos\left(\frac{b_1 + b_2 - 2b_3}{2} x\right) \cdot B_k \right) + g^2 A_o^2 A t t^2(z) \left(\sum_{k=1}^N l_k B_k \right)^2 + A_o^2 A t t^2(z) (g \sum_{k=1}^N B_k + 1) \quad (13)$$

其中, 第 1 项为 OFDM 信号, 第 2 项为 SSMI 干扰项, 第 3 项为直流分量。依据系统中 FF 的特性可

以得知，高频子载波部分的信号衰减程度会更大，所以当 k 值增大时， l_k 就会越大。假若估算的 l_k 值与子载波所受到的损伤系数十分逼近时，OFDM 信号就可以得到较好的补偿。

4 实验装置和结果

图 5 为采用两级级联变系数训练序列和预增强技术的 DDO-OFDM 基带传输的实验装置图。在传输系统的发送端，由分布式反馈(DFB, distributed feedback)激光器产生功率为 15.6 dBm、中心波长为 1565.48 nm 的连续光波。发送端 OFDM 信号通过任意波形发生器(AWG, arbitrary waveform generator)产生，AWG 发送速率为 4 Gsample/s，OFDM 信号子载波数为 256 bit，循环前缀为 32 bit，OFDM 信号通过强度调制器调制到光载波上，光调制器的偏置电压为 1.66 V，半波电压为 4.2 V。生成的基带 O-OFDM 信号的功率为 1.25 dBm，传输 100 km 标准单模光纤(SSMF)后，在接收之前先通过掺铒光纤放大器(EDFA, erbium doped fiber amplifier)把功率放大至 4 dBm，然后用光带通滤波器(OBF, optical band-pass filter)滤除带外噪声，并用衰减器(ATT, attenuator)将信号的功率降至适于光电探测器接收的水平。在接收端，用光电探测器接收将 O-OFDM 信号转换成模拟的电 OFDM 信号，接着由采样率为 20 GSample/s 的实时示波器(TDS)来对模拟 OFDM 信号进行采样得到数字基带 OFDM 信号。最后用 MATLAB 程序离线恢复出 OFDM 信号，并对系统的一些性能做出分析。

attenuator)将信号的功率降至适于光电探测器接收的水平。在接收端，用光电探测器接收将 O-OFDM 信号转换成模拟的电 OFDM 信号，接着由采样率为 20 GSample/s 的实时示波器(TDS)来对模拟 OFDM 信号进行采样得到数字基带 OFDM 信号。最后用 MATLAB 程序离线恢复出 OFDM 信号，并对系统的一些性能做出分析。

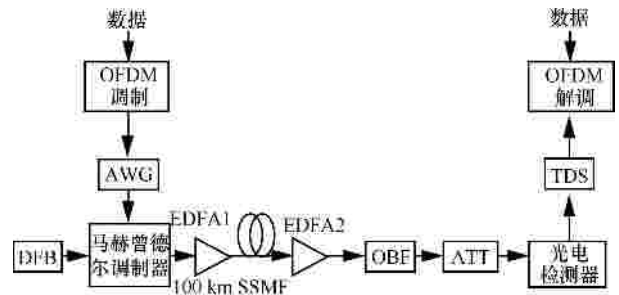


图 5 采用级联变系数训练序列和预增强技术的 DDO-OFDM 基带传输实验装置

不同结构训练序列的 O-OFDM 信号传输 100 km 的 SSMF 后，由实时示波器分析接收到的电 OFDM 信号频谱如图 6 所示，其中，图 6(a)为常规的奇偶交叉型训练序列结构的 OFDM 信号的电

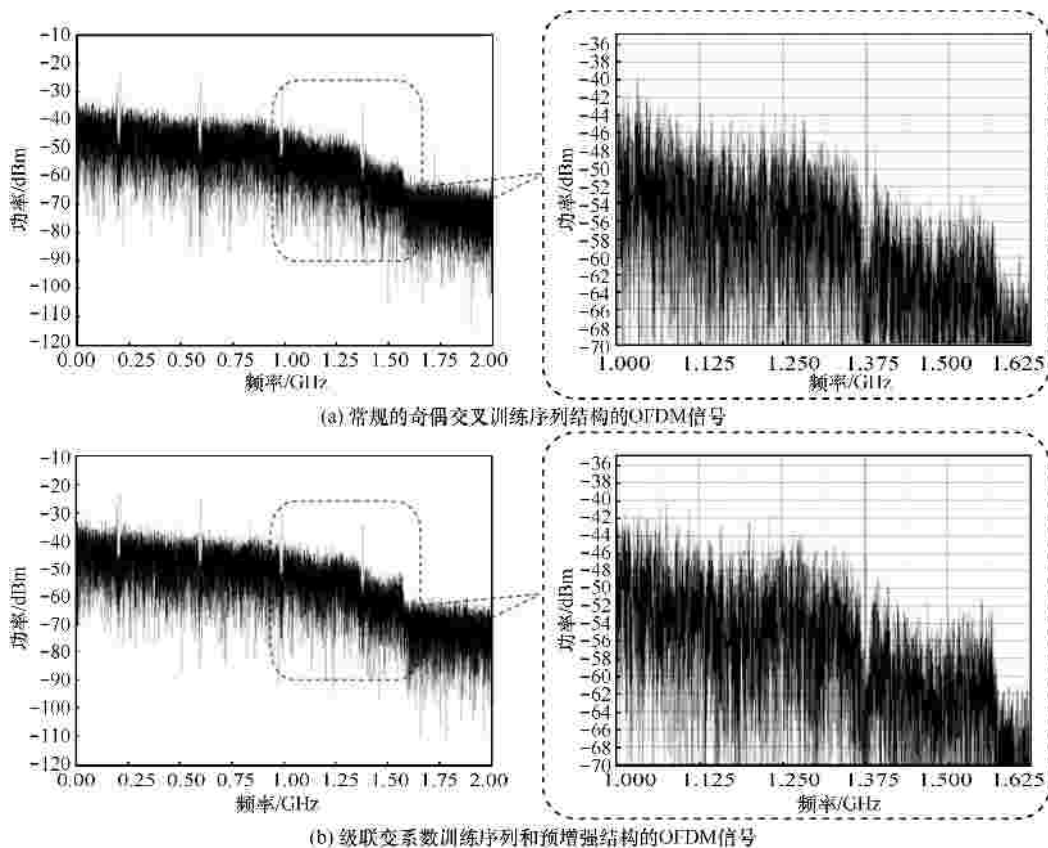


图 6 OFDM 信号电频谱图

频谱图，图 6(a)右边为高频部分局部放大电频谱图，图 6(b)为两级级联变系数训练序列和预增强结构的 OFDM 信号的频谱图，图 6(b)右边同样为高频部分局部放大电频谱图。从图 6(a)和图 6(b)可以清楚地看到 OFDM 信号在传输后其高频子载波部分出现一定程度的衰减，这也证明了上文分析的由传输系统中电子器件非理想频谱响应及光纤色散引入的频率选择性衰减(FF)的存在。从图 6(b)可以看出通过本实验方案的变系数训练序列结构和预增强技术，信号频谱的高频部分比常规的奇偶交叉型训练序列结构的 OFDM 信号的频谱要高。

图 7 给出的是几种不同训练序列结构的 OFDM 信号在传输 100 km 的 SSMF 后其误码率(BER)随不同光接收功率变化的曲线图。当误码率为 10^{-4} 时，常规的奇偶交叉型训练序列结构的 OFDM 信号、一个变系数训练序列和预增强结构的 OFDM 信号，以及两级级联变系数训练序列和预增强结构的 OFDM 信号的接收光功率分别为 -16.1 dBm、-17.4 dBm、-19.7 dBm。可以得出：两级级联变系数训练序列和预增强结构的 O-OFDM 信号所需要的接收光功率比常规的奇偶交叉型训练序列结构和一个变系数训练序列结构所需的都要小，而且在传输 100 km 的 SSMF 之后，其接收灵敏度比一个变系数训练序列结构的接收灵敏度可提高 1.5 dB 左右，比常规的奇偶交叉型训练序列结构的接收灵敏度可提高 3.5 dB 左右。说明变系数训练序列预增强技术通过放大 O-OFDM 信号的高频部分，能够有效地补偿信号在光纤传输过程中受到的频率选择性衰减和子载波互拍干扰等影响，从而较好地提高系统的接收灵敏度。

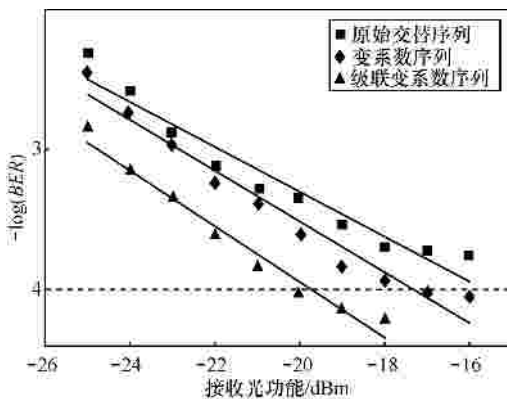


图 7 不同训练序列结构的 OFDM 信号的误码率曲线

5 结束语

对 DDO-OFDM 系统中 OFDM 信号所受到的高频衰减现象和子载波间互拍干扰现象进行了理论分析和实验研究。提出了使用级联变系数训练序列和预增强结构的 O-OFDM 信号来改善系统的性能，实验结果表明，在误码率为 10^{-4} 时，传输 100 km 的 SSMF 后，传输速率为 5 Gbit/s 的级联变系数训练序列和预增强的 O-OFDM 信号比常规交叉型的 O-OFDM 信号的接收灵敏度提高了 3.5 dB。说明在光纤链路中传输时，利用级联变系数训练序列和预增强结构的 OFDM 信号，可以减小 O-OFDM 信号子载波间的干扰及频率选择性衰减带来的影响，在某种程度上来说延长了光纤的传输距离，为信号的远距离、高质量传输提供了一种解决方案。

参考文献：

- [1] 陈林, 曹子峥, 董泽等. 直接检测的光 OFDM 信号光纤传输系统实验研究[J]. 中国激光, 2009, 36(3):554-557.
CHEN L, CAO Z Z, DONG Z, et al. An experimental system of direct-detection optical OFDM transmission[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(3):554-557.
- [2] TANG J M, LANE P M, SHORE K A. High-speed transmission of adaptively modulated optical OFDM signals over multimode fibers using directly modulated DFBs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1):429-441.
- [3] JOLLEY N E, KEE H, PICKARD P, et al. Generation and propagation of a 1 550 nm 10 Gbit/s optical orthogonal frequency division multiplexed signal over 1 000 m of multimode fiber using a directly modulated DFB[EB/OL]. <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFC-2005-OPF3&origin=search>.
- [4] DJORDJEVIC I B, VASIC B. Orthogonal frequency division multiplexing for high-speed optical transmission[J]. Optics Express, 2006, (9):3767-3775.
- [5] TANG J M, SHORE K A. Maximizing the transmission performance of adaptively modulated optical OFDM signals in multimode-fiber links by optimizing analog-to-digital converters[J]. Lightwave Technology, 2007, 25(3):787-798.
- [6] GIDDINGS R, TANG J. Experimental demonstration and optimization of a synchronous clock recovery technique for real-time end-to-end optical OFDM transmission at 11.25 Gbit/s over 25 km SSMF[J]. Optics Express, 2011, 19(3):2831-2845.
- [7] HUGUES-SALAS E, GIDDINGS R, JIN X, et al. Real-time experimental demonstration of low-cost VCSEL intensity-modulated 11.25 Gbit/s optical OFDM signal transmission over 25 km PON systems[J]. Optics Express, 2011, 19(4):2979-2988.
- [8] SCHMIDT B J C, LOWERY A J, ARMSTRONG J. Experimental demonstration of electronic dispersion compensation for long-haul transmission using direct-detection optical OFDM[J]. Lightwave

- Technology, 2008, 26(1):196-199.
- [9] PENG W R, TAKAHASHI H, MORITA I, *et al.* Direct-detection optical OFDM super channel[EB/OL]. <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ECOC-2011-We.8.A.4&origin=search>.
- [10] PENG W R, WU X X, ARBAB V R, *et al.* Theoretical and experimental investigations of direct-detected RF-tone-assisted optical OFDM systems[J]. *Lightwave Technology*, 2009, 27(10):1332-1339.
- [11] CAO Z Z, YU J J, WANG W P, *et al.* Direct-detection optical OFDM transmission system without frequency guard band[J]. *Photonics Technology Letters*, 2010, 22(11):736-738.
- [12] 孙山林. 自适应比特分配光正交频分复用的实验研究[J]. *光电子激光*, 2010, 21(6):865-867.
SUN S L. The experimental research of optical-OFDM experimental system based on adaptive bit power allocation[J]. *Journal of Optoelectronics Lasers*, 2010, 21(6):865-867.
- [13] DJORDJEVIC I B, LEI X, TING W. Adaptive LDPC-coded OFDM for radio-over-fiber technologies[A]. *LEOS Annual Meeting Conference Proceedings*[C]. Belek-Antalya, Turkey, 2009. 448-449.
- [14] 李兆玺, 胡贵军, 孔令杰. 自适应调制的正交频分复用多模光纤通信系统性能分析[J]. *中国激光*, 2008, 35(4):582-586.
LI Z X, HU G J, KONG L J. Performance analysis of a multimode fiber communications system based on the adaptive modulation orthogonal frequency division multiplexing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(4):582-586.
- [15] LOWERY A J. Improving sensitivity and spectral efficiency in direct-detection optical OFDM systems[A]. *Optical Fiber Communication Conference*[C]. San Diego, California, USA, 2008.1-3.
- [16] LOWERY A J, DU L, ARMSTRONG J. Orthogonal frequency division multiplexing for adaptive dispersion compensation in long haul WDM systems[EB/OL]. <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ECOC-2011-We.8.A.4&origin=search>.
- [17] GAO Y, YU J J, XIAO J N, *et al.* Direct-detection optical OFDM transmission system with pre-emphasis technique[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(14):2138-2145.
- [18] CAO Z Z, YU J J, XIA M M, *et al.* Reduction of intersubcarrier interference and frequency-selective fading in OFDM-ROF systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(16):2423-2429.
- [19] 郝耀鸿, 王荣, 李玉权等. 直接检测光正交频分复用系统噪声分析[J]. *光电子激光*, 2011, 22(9):1337-1341.
HAO Y H, WANG R, LI Y Q, *et al.* Noise analysis in direct detection optical OFDM system[J]. *Journal of Optoelectronics Lasers*, 2011, 22(9):1337-1341.
- [20] SHIEH W, DJORDJEVIC I. Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Optical Communications[M]. Beijing: The Publishing Company of Electronics Industry, 2011.
- [21] 史治国, 洪少华, 陈抗生. 基于 XILINX FPGA 的 OFDM 通信系统基带设计[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2009.
SHI Z G, HONG S H, CHEN K S. The Baseband Design of OFDM Communication System Based on XILINX FPGA[M]. Zhejiang: The Publishing Company of Zhejiang University, 2009.

作者简介：



吴巍(1988-),男,湖南岳阳人,湖南大学硕士生,主要研究方向为光纤无线通信技术和光正交频分复用等。

肖江南(1976-),男,湖南祁阳人,湖南大学博士生,主要研究方向为光通信。

陈明(1987-),男,苗族,湖南怀化人,湖南大学博士生,主要研究方向为光通信。

余建军(1968-),男,湖南祁阳人,湖南大学教授,主要研究方向为光通信。

陈林[通信作者](1968-),男,湖南祁阳人,湖南大学教授、博士生导师,主要研究方向为光通信。E-mail: lilichen12@vip.163.com。