

相干光正交频分复用系统中光调制的优化设计

郝耀鸿 李玉权 王荣

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 相干光正交频分复用(COOFDM)是目前光传输领域的研究热点之一。COOFDM 系统采用马赫-曾德尔光调制器(MZM)实现射频(RF)信号到光的转换,而正交频分复用(OFDM)信号对非线性十分敏感,所以在系统设计上最关键的就是实现信号的线性传输。从理论上分析了 COOFDM 系统中 MZM 对 OFDM 信号的非线性影响,通过对 MZM 偏置点及调制指数优化,实现 COOFDM 系统的最佳传输,同时对 COOFDM 系统品质因子 Q 与偏置点及调制指数关系进行了仿真。结果表明,为了实现最佳线性传输,不同于传统的基于强度调制/直接检测系统(偏置点选在积分点),COOFDM 系统中 MZM 最佳偏置点选在零点;MZM 调制指数的选择也会对系统性能产生影响,当 COOFDM 系统中 MZM 调制指数为 0 dB 时,系统性能达到最佳。

关键词 相干光通信;光调制;正交频分复用;偏置点控制

中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0305003

Optimum Design for Optical Modulator in Coherent Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing System

Hao Yaohong Li Yuquan Wang Rong

(Institute of Communications Engineering, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract Coherent optical orthogonal frequency-division multiplexing (COOFDM) is being considered as a promising technology for future optical transmission. In COOFDM systems, optical Mach-Zehnder modulators (MZM) are used to up-convert orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) signal from radio frequency (RF) domain to optical domain. However, OFDM is very sensitive to nonlinearity, so subsequently study of nonlinearity impact from MZM is of great interest. The impact of COOFDM systems introduced by the nonlinearity of MZM is focused on and a numerical simulation to identify system Q -value under various MZM bias points and modulation index is performed. Results show that in contrast to intensity-modulation/direct-detected system (bias point is quadrature point), optimal modulator bias point is zero point and optimal modulation index is 0 dB for COOFDM system.

Key words coherent optical communications; optical modulator; orthogonal frequency division multiplexing; bias control

OCIS codes 070.1170; 070.2465; 070.4340

1 引言

正交频分复用(OFDM)是一种无线环境下的高速传输技术,通过并行传输一组正交子载波,有效提高频谱利用率,被广泛应用于广播式的音频、视频领域和民用通信系统。近几年,随着数字信号处理技术的迅速发展,OFDM 在长距离光传输中的应用也

受到极大的关注^[1~3],光 OFDM 作为多载波系统,尽管整个信道是不平坦的衰落信道,但在各子信道上的衰落却近似平坦,信道均衡简单,在传输过程中无需额外的色散补偿,可有效降低光纤色度色散和偏振模色散对系统的影响,实现高光速传输^[4,5]。光 OFDM 系统按其检测方法可分为光直接检测

收稿日期:2010-09-07;收到修改稿日期:2010-11-08

基金项目:国家自然科学基金(60871075)资助课题。

作者简介:郝耀鸿(1983—),男,博士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail:hyh82910@126.com

导师简介:李玉权(1944—),男,教授,主要从事光通信方面的研究。E-mail:proflyq@126.com

OFDM^[6,7] (DDOFDM) 和 相 干 光 OFDM^[8] (COOFDM), 而 其中 COOFDM 是 近 年 来 光 传 输 领 域 的 研 究 热 点 之 一。COOFDM 作 为 一 种 相 干 通 信 系 统, 采 用 马 赫-曾 德 尔 光 调 制 器 (MZM) 实 现 OFDM 射 频 信 号 到 光 域 的 转 换^[9], 实 现 的 是 信 号 在 电 域 与 光 场 之 间 的 转 换, 而 传 统 意 义 上 基 于 单 载 波 的 强 度 调 制/直 接 检 测 (IM/DD) 系 统, 是 通 过 强 度 调 制 将 信 号 调 制 到 光 强 度 上^[10], 实 现 的 是 信 号 在 电 域 与 光 功 率 之 间 的 转 换^[11,12]; 同 时, 由 于 OFDM 信 号 是 多 个 子 载 波 时 域 波 形 的 叠 加, 峰 均 值 功 率 比 (PAPR) 较 大, 易 受 非 线 性 影 响^[13]。所 以 不 同 于 传 统 IM/DD 系 统, COOFDM 系 统 设 计 上 最 关 键 的 就 是 实 现 OFDM 信 号 的 线 性 传 输。

因 此, 对 系 统 中 MZM 非 线 性 分 析 及 参 数 优 化 设 计 十 分 重 要。本 文 对 COOFDM 系 统 中 MZM 非 线 性 效 应 进 行 了 较 为 详 细 的 数 学 分 析, 通 过 对 MZM 偏 置 点 及 调 制 深 度 的 分 析 和 仿 真, 提 出 光 调 制 优 化 设 计 方 案。理 论 分 析 和 仿 真 结 果 表 明, 当 COOFDM 系 统 中 MZM 选 在 零 偏 置 点、调 制 指 数 为 0 dB 时, COOFDM 系 统 传 输 性 能 最 优, 光 调 制 器 实 现 对 OFDM 信 号 的 最 佳 线 性 转 换。

2 COOFDM 系统光调制分析

2.1 COOFDM 系统模型

COOFDM 系 统 组 成 如 图 1 所 示。发 送 端: 输 入 数 据 经 正 交 振 幅 调 制 (QAM) 对 信 息 的 幅 度、相 位 进 行 调 制, 为 实 现 均 衡, 加 入 训 练 序 列 及 导 频 信 息, 串 并 变 换 (S/P) 后 通 过 反 向 快 速 傅 里 叶 变 换 (IFFT) 进 行 载 波 调 制, 输 出 为 子 载 波 时 域 信 号 的 叠 加, 为 了 消 除 符 号 间 干 扰 (ISI), 加 入 循 环 前 缀; 输 出 分 成 两 支 路 (对 应 信 号 实 部、虚 部), 经 数 模 转 换 (DAC), 将 OFDM 信 号 变 为 模 拟 信 号, 再 通 过 低 通 滤 波 (LP), 滤 去 信 号 中 高 频 成 分; 输 出 I/Q 支 路 信 号 分 别 通 过 MZM 直 接 调 制 到 光 频 (光 I/Q 调 制), 之 后 时 域 信 号 相 加, 两 支 路 有 90° 相 位 差, 光 调 制 OFDM 信 号 在 单 模 光 纤 (SMF) 中 传 输。接 收 端: 首 先 经 过 平 衡 光 电 检 测 器 将 光 信 号 转 化 为 电 信 号, 分 别 提 取 出 信 号 实 部 和 虚 部, 之 后 通 过 低 通 滤 波 和 模 数 转 换 (ADC), 将 OFDM 模 拟 信 号 转 化 为 数 字 信 号, 去 除 循 环 前 缀, 通 过 快 速 傅 里 叶 变 换 (FFT) 实 现 信 号 解 调, 并 从 中 提 取 出 训 练 序 列 和 导 频 信 息, 对 OFDM 符 号 中 相 位 噪 声 (PN) 及 色 散 (CD) 引 起 的 相 位 偏 移, 通 过 频 域 的 单 抽 头 均 衡 进 行 补 偿, 去 除 噪 声 影 响, 从 而 还 原 出 发 送 信 号。

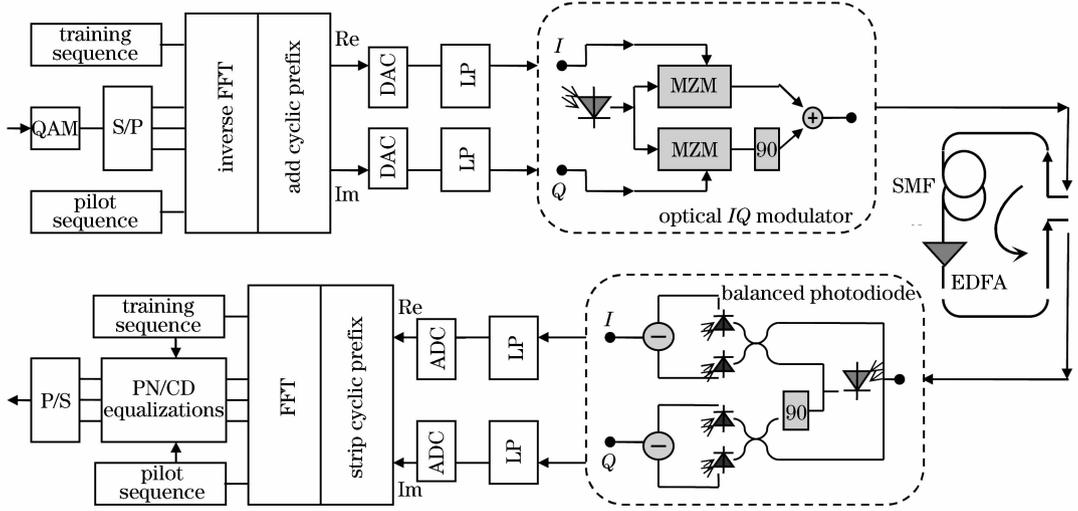


图 1 COOFDM 系统框图
Fig. 1 COOFDM system block diagram

2.2 光调制非线性分析

MZM 将 输 入 光 波 分 为 功 率 相 等 的 两 束, 分 别 通 过 两 路 光 波 导 传 输, 光 波 导 由 电 光 材 料 制 成, 其 折 射 率 随 外 加 电 压 的 大 小 而 变 化, 从 而 使 两 束 光 信 号 在 输 出 端 产 生 相 位 差。设 上 下 支 路 驱 动 电 压 为 V_1, V_2 , 产 生 的 相 位 偏 移 为 θ_1, θ_2 , 调 制 光 信 号 为 $E_o(t) = \exp(j\omega_o t + j\varphi)$, ω_o 为 光 的 角 频 率, φ 为 初 始 相 位, V_π 为 半 波 开 关 电 压。根 据 MZM 调 制 原

理^[14~16], 输 出 光 信 号 为

$$E_{out}(t) = E_o(t) [\exp(j\theta_1) + \exp(j\theta_2)] = 2E_o(t) \exp\left(j\pi \frac{V_1 + V_2}{2V_\pi}\right) \times \cos\left(\pi \frac{V_1 - V_2}{2V_\pi}\right), \quad (1)$$

从 (1) 式 可 以 看 出, 输 出 的 调 制 光 信 号 由 幅 度 调 制 和 相 位 调 制 (啁 啾) 两 部 分 组 成, 为 了 使 调 制 器 工 作

在无啁啾状态,两调制臂的调制电压通常选择为“推挽”工作方式,即在两臂之间施加一固定的偏置电

压, $V_{\text{bias}} = V_1 + V_2$, 令 $V_{\text{in}} = 2V_1$, V_{in} 为输入射频信号, k 为比例常数, 则输出光信号可变换为

$$E_{\text{out}}(t) = 2E_o(t) \exp\left(j\pi \frac{V_{\text{bias}}}{2V_\pi}\right) \cos\left(\pi \frac{V_{\text{in}} - V_{\text{bias}}}{2V_\pi}\right) = kE_o(t) \cos\left(\pi \frac{V_{\text{in}} - V_{\text{bias}}}{2V_\pi}\right) \exp(j\omega_o t + j\varphi), \quad (2)$$

对于光 I/Q 调制, OFDM 信号的实部 V_I 和虚部 V_Q 分别输入到两个支路, V_{dc} 为直流偏压, 则光调制信号

$$E_{IQ}(t) = k \cos\left(\pi \frac{V_I + V_{\text{dc}}}{2V_\pi}\right) \exp(j\omega_o t + j\varphi) + k \cos\left(\pi \frac{V_Q + V_{\text{dc}}}{2V_\pi}\right) \exp\left(j\omega_o t + j\varphi + j\frac{\pi}{2}\right), \quad (3)$$

为便于分析, 设 OFDM 信号包含两个子载波, $V_1 = V \exp(j\omega_1 t)$, $V_2 = V \exp(j\omega_2 t)$, 代入(3) 式得

$$E_{IQ}(t) = kE_o(t) \left\{ \cos\left[\frac{\pi V}{2V_\pi}(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) + \frac{\pi V_{\text{dc}}}{2V_\pi}\right] + j \cos\left[\frac{\pi V}{2V_\pi}(\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t) + \frac{\pi V_{\text{dc}}}{2V_\pi}\right] \right\} = k \{ \cos[m(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) + \beta] + j \cos[m(\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t) + \beta] \} \exp(j\omega_o t + j\varphi), \quad (4)$$

式中相位偏移 $\beta = \frac{\pi V_{\text{dc}}}{2V_\pi}$, 调制指数 $m = \frac{\pi V}{2V_\pi}$, 利用贝塞尔函数对信号余弦部分展开^[17], $J_n(m)$ 为 n 阶第一类贝

塞尔函数。信号部分(一阶分量)为

$$E_{\omega_{1,2}}(t) = 2\sin(\beta)J_0(m)J_1(m)\exp(j\omega_{1,2}t)E_o(t), \quad (5)$$

二阶互调项

$$E_{\omega_{1,2}-\omega_{2,1}}(t) = 2\cos(\beta)J_1^2(m)\exp[j(\omega_{1,2} - \omega_{2,1})t]E_o(t), \quad (6)$$

三阶互调项

$$E_{2\omega_{1,2}-\omega_{2,1}}(t) = 2\sin(\beta)J_1(m)J_2(m)\exp[j(2\omega_{1,2} - \omega_{2,1})t]E_o(t), \quad (7)$$

从(6)式可以看出, 若相位偏移 $\beta = \pi/2$, 即 $V_{\text{dc}} = V_\pi$, 光调制信号中二阶分量为零, 即当 COOFDM 系统 MZM 偏置点选在零点, 可消除二阶非线性分量, 减小对有用信号的非线性影响。从 MZM 传输曲线也可以看出, 如图 2 所示, 对于 COOFDM 系统, 由于信号转换是在电域与光场之间, 光调制器的最佳偏置点选在零点时, 可使驱动电压与光场转换呈最佳线性关系, 而对于传统 IM/DD 系统, 显然 MZM 的最佳偏置点应选在积分点, 即偏置点选择在半波开关电压的一半处。另外, 从(7)式可以看出, 随着调制指数 m 的变大, 调制信号中产生的高阶分量就越多, 信道干扰也就越严重; 调制指数 m

也不能过小, 分析(5)式, 根据贝塞尔函数特性, $J_0(0)=1$, 但 $J_1(0)=0$, 如果 m 变小, 有用信号所占光功率比例越小, 残留光载波功率就越大, 所以在调制指数 m 的选择上存在一个最优值。

3 系统仿真

3.1 条件参数

采用蒙特-卡罗法对系统仿真进行评估, 对 32 组 OFDM 符号(每一组有 3 个导频子载波, 前 4 组为训练序列)进行数字仿真。码率为 10 Gb/s, 采用 QAM 调制, 串并变换 128 路, 每一路携带 2 bit 信息, 通过超采样加入零载波, 载波总数为 256, 循环前缀为总载波数的 1/8; 光源采用分布反馈(DFB)激光器, 光频为 193.1 THz, 线宽为 100 kHz; COOFDM 系统光 I/Q 调制器的上下支路射频驱动信号分别为 $\pm V_I$ ($\pm V_Q$), 直流偏压分别为 $V_{\text{dc}} = \pm V_\pi/2$ 。系统采用标准单模光纤, 色散系数 16 ps/(nm·km), 非线性系数为 $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, 有效面积 $80 \mu\text{m}^2$, 损耗 0.2 dB/km, 每隔 80 km 加入掺铒光纤放大器(EDFA, 噪声系数 6 dB), 用于补偿信道衰减引起的 16 dB 功率损耗, 系统中不加入色散补偿模块, 不考虑光电检测器噪声。系统品质因子 $Q_{\text{dB}} = 20 \lg q$, 其中 $q^2 = u_x^2/\sigma_x^2 = u_y^2/\sigma_y^2$, u 为接收信号星座图(均衡

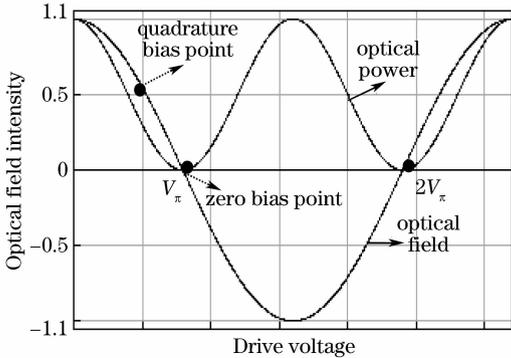


图 2 驱动电压与 MZM 光场、光强度关系曲线

Fig. 2 Transfer functions for optical intensity (field) against drive voltage

后)中 x 或 y 方向上的信号平均值, σ^2 为该方向上的方差^[18]。

3.2 仿真结果

图3为COOFDM系统品质因子 Q 与MZM偏置点的关系曲线。从中可以看出,系统 Q 值随着MZM偏置点的选择而变化:当偏置点在积分点时($\beta = \pi/4$),系统 Q 值为6.9 dB;当偏置点在零点时

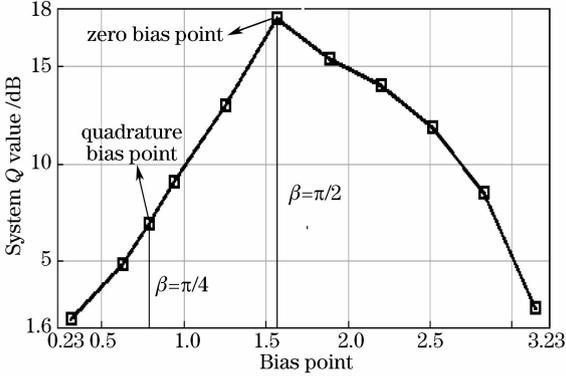


图3 偏置点选择与系统 Q 值的关系曲线

Fig. 3 System Q value as a function of bias point

($\beta = \pi/2$), 系统 Q 值为17.5 dB, 达到曲线最大值, 较积分偏置点系统性能提高10 dB以上。之后, 随着偏置点的变化, 系统 Q 值逐渐减小。仿真曲线较好地验证了(6)式的分析结果, 同时也与文献[9]中图7给出的结论相吻合。

COOFDM系统性能也与MZM调制指数有关。系统仿真了在不同调制指数情况下, 接收信号星座图及调制光信号功率谱, 如图4所示, 为了便于分析, 图中调制指数 $M = 20 \lg m$ 。由于色散引起相位偏移及非线性相位噪声影响, 接收信号星座图偏离原始位置并产生旋转, 通过提取训练序列和导频信息获取噪声信息^[8], 经均衡后的星座图基本恢复。当 $M = -12$ dB时, 由于MZM调制中产生的非线性作用, 信号星座图较离散; 而当 $M = 0$ dB时, 由于信号中二阶非线性分量消除, 接收信号星座图较紧凑, 坐标点相对集中。另外, 随着调制指数 M 的增加, 有用信息所占光功率比例也增大, 从而产生的信号频谱外的高阶分量也增多。

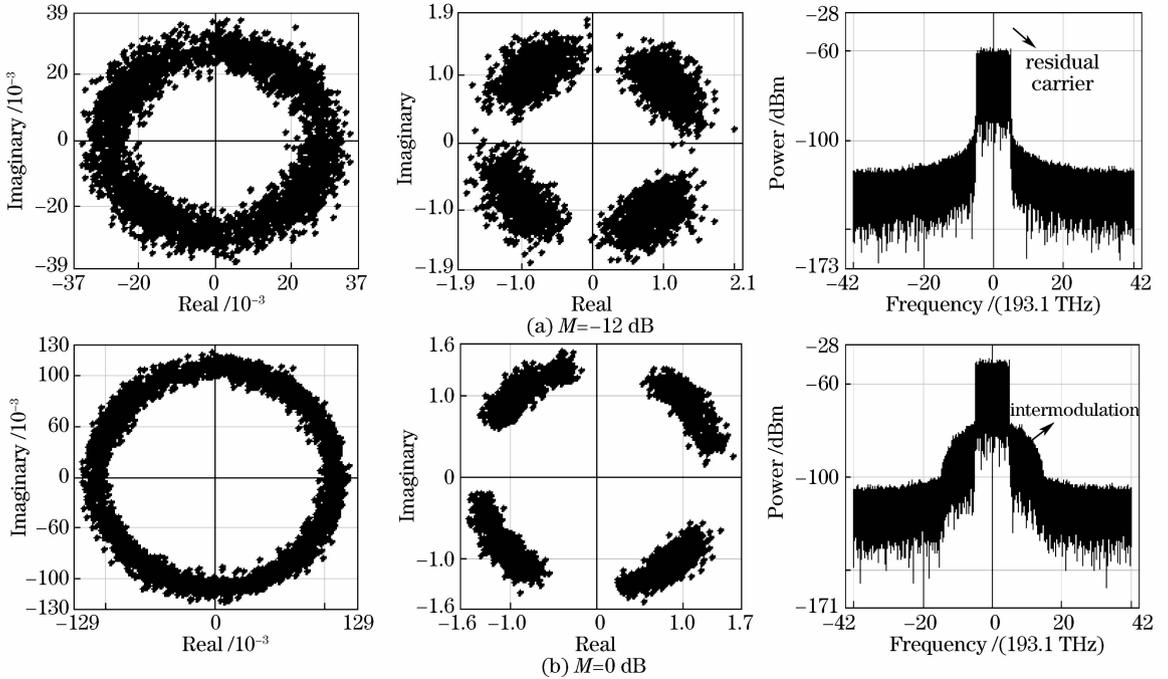


图4 COOFDM系统接收信号星座图(均衡前后)及调制光功率谱

Fig. 4 Electrical constellations before/after equalization and optical power in COOFDM system

图5为MZM在零偏置点和积分偏置点条件下系统 Q 值随调制指数 M 的变化曲线。从中可以看出, 对于MZM选择在零偏置点的COOFDM系统, 当 M 较小时, 系统 Q 值较小, 随着 M 的增加, Q 值逐渐增大, 当 M 达到0 dB时, 系统性能最佳, Q 值为24.5 dB, 随着 M 继续增加, Q 值逐渐减小。对于积分偏置点, 系统 Q 值随着调制指数逐步增加, 当 M

为0 dB时, 系统 Q 值为14.3 dB, 较零偏置点 Q 值减小10 dB。仿真曲线反映出的结论符合(5)和(7)式的分析结果。

4 结 论

分析了COOFDM系统中MZM对OFDM信号的非线性作用, 通过对系统品质因子 Q 与MZM

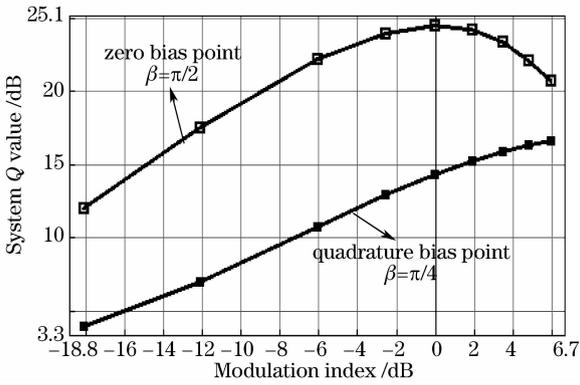


图5 COOFDM系统在零偏置点和积分偏置点条件下Q值与调制指数M的关系曲线

Fig. 5 System Q value as a function of modulation index M at the bias points of $\beta=\pi/2$ and $\beta=\pi/4$

偏置点及调制指数关系进行数字仿真,并与传统IM/DD系统进行比较。结果表明,为了实现信号的线性传输,COOFDM系统MZM偏置点选择在零点,与积分偏置点比较系统Q值有10 dB的提高;同时,系统性能与MZM调制指数有关,当M为0 dB时,系统性能最佳,与积分偏置点比较系统Q值有10 dB的提高。

参 考 文 献

- 1 William Shieh, Xingwen Yi, Yiran Ma *et al.*. Coherent optical OFDM: has its time come [J]. *Journal of Optical Networking*, 2008, **7**(3):234~255
- 2 Jean Armstrong. OFDM for optical communications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3):189~204
- 3 Li Zhaoxi, Hu Guijun, Kong Lingjie. Performance analysis of a multimode fiber communication system based on the adaptive modulation orthogonal frequency division multiplexing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):582~586
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
- 4 Qi Yang, Yan Tang, Yiran Ma *et al.*. Experimental demonstration and numerical simulation of 107-Gb/s high spectral efficiency coherent optical OFDM [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3):168~176
- 5 Yan Tang, William Shieh. Coherent optical OFDM transmission up to 1 Tb/s per channel [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(16):3511~3517
- 6 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
- 7 A. J. Lowery, J. Armstrong. 10 Gbit/s multimode fiber link using power-efficient orthogonal frequency-division multiplexing [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(25):10003~10009
- 8 W. Shieh, C. Athaudage. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(10):587~589
- 9 W. Shieh, H. Bao, Y. Tang. Coherent optical OFDM: theory and design [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2):841~859
- 10 Xia Minmin, Dong Ze, Cao Zizheng *et al.*. Performance comparison of 40 GHz optical millimeter wave with OFDM signal generated by an optical phase modulator and an optical intensity modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6):1586~1591
- 夏敏敏,董泽,曹子峥等. 光相位调制器和光强度调制器产生40 GHz光载OFDM毫米波信号的传输性能比较[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6):1586~1591
- 11 Jochen Leibrich, Abdulmir Ali, Henning Paul *et al.*. Impact of modulator bias on the OSNR requirement of direct-detection optical OFDM [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(15):1033~1035
- 12 J. Daniel, Fernandes Barros, Joseph M. Kahn. Optical modulator optimization for orthogonal frequency-division multiplexing [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(13):2370~2378
- 13 Rongqing Hui. Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(3):417~427
- 14 Wen He, Ge Yihong, Jiang Huan. Monitoring bias offset drift of Mach-Zehnder modulator based on coherent hybrid scheme [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8):2035~2041
- 闻和,葛逸宏,姜欢等. 基于相干自混频原理的马赫-曾德尔调制器偏置点的监测[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8):2035~2041
- 15 He Jing, Liu Limin, Chen Lin *et al.*. Generation of advanced modulation formats based on Mach-Zehnder modulators [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8):1185~1190
- 何晶,刘丽敏,陈林等. 基于马赫-曾德尔调制器的先进调制格式的产生[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8):1185~1190
- 16 Liao Jinkun, Li Heping, Tang Xiongguo *et al.*. Operator expansion analysis of Mach-Zehnder waveguide in polymeric electro-optic modulators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6):1597~1602
- 廖进昆,李和平,唐雄贵等. 聚合物光电调制器中马赫-曾德尔波导的算子展开法分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6):1597~1602
- 17 Y. Tang, W. Shieh. Optimum design for RF-to-optical up-converter in coherent optical OFDM systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(7):483~485
- 18 A. J. Lowery, J. Armstrong. Orthogonal-frequency-division multiplexing for dispersion compensation of long-haul optical systems [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(6):2079~2084