

文章编号: 0258-7025(2010)02-0465-06

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

王文沛 陈 林 董 泽 曹子峥 卢 嘉 余建军

(湖南大学计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082)

摘要 从理论和实验两方面比较了光纤无线通信(ROF)系统中分别传输开关键控(OOK)与正交频分复用(OFDM)信号的性能。从理论上对产生的毫米波进行了色散效应分析,证明了在 ROF 系统中 OFDM 信号长距离传输后没有受到严重的码间干扰(ISI),只是毫米波信号的相位发生了变化;OOK 信号受到了严重的码间干扰。实验证明在无色散补偿的情况下,2.5 Gb/s 的 OOK 信号在单模光纤(SMF)中传输 60 km 后眼图完全闭合,误码率(BER)只能达到 10^{-3} ,而采用 OFDM 信号传输 130 km 星座图仍然很好,误码率达到 10^{-4} ,这说明在 ROF 系统中 OFDM 信号的传输性能要优于 OOK。

关键词 光通信;光纤无线通信系统;载波抑制;毫米波;正交频分复用;开关键控

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103702.0465

Performance Comparison between On-Off Keying and Orthogonal Frequency Division Multiplexing Signals in 40 GHz Radio-Over-Fiber Systems

Wang Wenpei Chen Lin Dong Ze Cao Zizheng Lu Jia Yu Jianjun

(School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract The transmission performance of on-off keying (OOK) and orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signals in radio-over-fiber (ROF) system is experimentally and theoretically studied. The theoretical results show that OFDM signal is almost not affected by inter-symbol interference (ISI), only with the phase changed, where as OOK signal is seriously affected by ISI. The experiment results show that the eye diagram of 2.5 Gb/s OOK signal is closed when transmitting over 60 km in single mode fiber (SMF), and its bit error rate (BER) can only reach 10^{-3} . The constellation of OFDM is clear when transmitting over 130 km with BER of 10^{-4} . All theoretical and experimental results show that the performance of OFDM is better than that of OOK in ROF system.

Key words optical communications; radio-over-fiber system; optical carrier suppression; millimeter-wave; orthogonal frequency division multiplexing; on-off keying

1 引 言

为了满足日益增加的带宽对高速数据、图像和多媒体的需求,宽带无线和有线传输技术已经得到广泛的应用。但是无线宽带传输时会导致大的功率损耗,为了解决这个问题,提出了光纤无线通信

(ROF)技术,该技术能够将无线和光纤通信进行很好的融合,对于未来的宽带通信以及多重服务的网络应用有着广阔的前景,它利用了光纤低损耗、超大带宽以及抗电磁干扰等特性来传输无线信号,满足了移动和固定用户对带宽的要求。光生毫米波技术

收稿日期:2008-12-24;收到修改稿日期:2009-05-06

基金项目:国家 863 计划(2007AA01Z263,2009AA01Z222,2009AA01Z220)、湖南省自然科学基金(06JJ50108)和教育部光通信和光波技术重点实验室(北京邮电大学)开放基金资助项目。

作者简介:王文沛(1984—),男,硕士研究生,主要从事光纤无线通信系统方面的研究。E-mail:wangwen_pei@126.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系统和光分组交换方面的研究。

E-mail:linchenhnu@sina.com

在 ROF 技术中起着不可或缺的作用^[1~14]。由于毫米波是在中心站产生和处理,这就将昂贵的成本和设备转移到了中心站,基站只需光电转换,并通过天线发送出去,当多个远端的基站共享这些设备时,大大降低了基站的成本。通常来说,产生毫米波的方法有外部调制、直接调制以及光外差技术,由于直接调制的带宽有限,在长距离传输时易受到色散和光源啁啾的影响,不适合在大容量和高带宽的系统中传输。光外差技术要求两束光源具有很高的相关性。外调制具有高的带宽,不受光源影响,是产生毫米波最有效、实现最简单的方法。使用外部调制实现数据传输已有较多报道^[1~13],其中大部分研究的是 ROF 系统中进行开关键控(OOK)码元传输,OOK 信号在光纤中传输时会受到色散的影响。正交频分复用技术(OFDM)在最近的宽带光无线传输网络中得到了广泛的研究和应用,OFDM 频谱利用率高,在光纤中传输时具有抗色度色散和偏振模色散的能力^[6]。最近,文献[2]实现了在下行链路使用 OFDM 传输毫米波信号,上行链路使用 OOK 传输基带信号的全双工 ROF 系统。虽然人们在 ROF 系统中采用 OOK 和 OFDM 信号做了一些有益的研究,但并没有将 OFDM 和 OOK 传输性能进行详细的比较。

本文研究并比较了 OFDM 与 OOK 信号在 ROF 系统中的传输性能。OOK 信号在光纤中传输时,色散使得两个边带以及携带的数据发生了不同的延迟,导致了码间干扰(ISI)的产生,限制了其传输距离。而 OFDM 信号在光纤中传输时,色散产生的相移只是影响了毫米波信号的相位,并没有影响到边带上下携带的数据。对产生后的毫米波的色散性能进行了理论分析,并通过实验研究,比较信号传输前后的眼图、星座图以及误码率的变化。实验结果表明 OFDM 信号经过光纤传输后的性能要比 OOK 信号好,将 OFDM 与 ROF 技术相结合能够抵抗光纤色散的影响,大大地提高了 ROF 系统的传输性能。

2 理论分析

2.1 OOK 信号传输

假设分布反馈式(DFB)激光器发出的光信号的表达式为

$$E_{\text{in}}(t) = E_0 \cos(\omega_0 t), \quad (1)$$

式中 E_0 为幅度, ω_0 为角频率。射频电驱动信号的表达式为

$$V(t) = V_{\text{DC}} + V_{\text{RF}} \cos(\omega_{\text{RF}} t), \quad (2)$$

式中 ω_{RF} 为射频信号的角频率,经过强度调制器后的输出信号为

$$E_{\text{outOOK}}(t) = E_0 \cos(\omega_0 t) \left\{ \cos\left(\frac{\phi_0}{2}\right) \left[J_0(b) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(b) \cos(2n \omega_{\text{RF}} t) \right] - 2 \sin\left(\frac{\phi_0}{2}\right) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(b) \cos[(2n-1) \omega_{\text{RF}} t] \right\}, \quad (3)$$

式中 $\phi_0 = \pi \frac{V_{\text{DC}}}{V_{\pi}}$, $b = \pi \frac{V_{\text{RF}}}{V_{\pi}}$, J 为贝塞尔函数。调节强度调制器的直流偏置,使 $\cos(\phi_0/2) = 0$, 然后调节 b 的值,使得高阶边带可以忽略不计,即 $J_3(b) \approx 0$, (3) 式可以简化为

$$E_{\text{outOOK}}(t) = E_0 J_1(b) \cos(\omega_0 + \omega_{\text{RF}})t + E_0 J_1(b) \cos(\omega_0 - \omega_{\text{RF}})t, \quad (4)$$

设 OOK 码元的表达式为 $s(t) = a_k g(t - nT_s)$, 其中 a_k 是指第 k 个电平所对应的数值(通常取 0 或者 1), T_s 为数据信号的码元周期, $s(t)$ 为码元波形。通过强度调制器将信号码元加载到光信号后的表达式为

$$E_{\text{outOOK}}(t) = E_0 s(t) J_1(b) \cos(\omega_0 + \omega_{\text{RF}})t + E_0 s(t) J_1(b) \cos(\omega_0 - \omega_{\text{RF}})t. \quad (5)$$

当光信号在长度为 L 的光纤中传输时,两个边带由于色散发生了相位偏移,设相位偏移常数为 $\beta(\omega)$, 其中 $\beta'(\omega)$, $\beta''(\omega)$ 为一阶、二阶相位偏移常数,使用泰勒公式展开,得到

$$\beta(\omega_0 \pm \omega_{\text{RF}}) = \beta(\omega_0) \pm \omega_{\text{RF}} \beta'(\omega_0) + \frac{1}{2} \omega_{\text{RF}}^2 \beta''(\omega_0) + \dots, \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式,则

$$E_{\text{outOOK}}(t) = E_0 s(t + \theta_{+1}) J_1(b) \cos(\omega_0 + \omega_{\text{RF}})(t + \theta_{+1}) + E_0 s(t + \theta_{-1}) J_1(b) \cos(\omega_0 - \omega_{\text{RF}})(t + \theta_{-1}), \quad (7)$$

式中 $\theta_{\pm 1} = \frac{\beta(\omega_0 \pm \omega_{\text{RF}})z}{\omega_0 \pm \omega_{\text{RF}}}$ 。

当信号通过光电二极管后的光电流为

$$I_{\text{outOOK}}(t) = \mu |E_{\text{outOOK}}(t)|^2 = I_{\text{DC}}(t) + I_{\text{RF}}(t),$$

$$I_{\text{DC}}(t) = \frac{1}{2}\mu E_0^2 s^2(t + \theta_{+1}) J_1^2(b) + \frac{1}{2}\mu E_0^2 s^2(t + \theta_{-1}) J_1^2(b),$$

$$I_{\text{RF}}(t) = \mu E_0^2 s(t + \theta_{+1}) s(t + \theta_{-1}) J_1^2(b) \cos[2\omega_{\text{RF}} t + 2\beta'(\omega_0)z], \quad (8)$$

式中 μ 为光电二极管的响应度。从(8)式可以看出光电流包括直流和射频分量,在射频分量中基带信号码元 $s(t)$ 同时存在着 θ_{+1} 与 θ_{-1} 的时延,在光纤中传输时造成了码间干扰,码元的占空比变小^[15~17]。设两个边带的传输速率分别为

$$v_{+1}(t) = (\omega_0 + \omega_{\text{RF}})\beta^{-1}(\omega_0 + \omega_{\text{RF}}), \quad v_{-1}(t) = (\omega_0 - \omega_{\text{RF}})\beta^{-1}(\omega_0 - \omega_{\text{RF}}), \quad (9)$$

两个边带时延差为

$$\Delta\tau = \frac{z}{v_{+1}} - \frac{z}{v_{-1}} = \frac{\beta(\omega_0 + \omega_{\text{RF}})z}{\omega_0 + \omega_{\text{RF}}} - \frac{\beta(\omega_0 - \omega_{\text{RF}})z}{\omega_0 - \omega_{\text{RF}}} \approx 2\omega_{\text{RF}}\beta'(\omega_0)z = 2\lambda_0^2 D c^{-1} f_{\text{RF}} z, \quad (10)$$

当 $\Delta\tau \rightarrow \eta/R$ 时,传输的距离为 $z < \frac{\eta c}{2R\lambda_0^2 D f_{\text{RF}}}$,其中 η 为码元占空比, R 为数据传输速率, D 为光纤的色

散系数, λ_0 为光载波的波长, c 为真空中光速, f_{RF} 为电射频信号的频率。当连续光波长 λ_0 为 1543.75 nm,电射频信号的频率 $f_{\text{RF}} = 20$ GHz 时,OOK 码元占空比为 $\eta = 1$ 时,通过理论计算得到数据传输速率为 2.5 Gb/s 的 OOK 信号在标准单模光纤中传输的最大距离为 74 km。

2.2 OFDM 信号传输

设 OFDM 信号的表达式为 $s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} d_n \exp\left(j2\pi \frac{n}{T} t\right)$,其中 N 为子载波的个数, d_n 为 OFDM 子载波的数据序列, T 为子载波的周期,经过光纤传输后,其输出表达式为

$$E_{\text{outOFDM}}(t) = \frac{E_0}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} d_n \exp\left[j2\pi \frac{n}{T} (t + \theta_{+1})\right] J_1(b) \cos(\omega_0 + \omega_{\text{RF}})(t + \theta_{+1}) + \frac{E_0}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} d_n \exp\left[j2\pi \frac{n}{T} (t + \theta_{-1})\right] J_1(b) \cos(\omega_0 - \omega_{\text{RF}})(t + \theta_{-1}), \quad (11)$$

经过光电二极管拍频后的光电流的表达式为

$$I_{\text{outOFDM}}(t) = I_{\text{DC}} + I_{\text{RF}},$$

$$I_{\text{DC}}(t) = \frac{\mu E_0^2}{2N} J_1^2(b) \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} d_n \exp\left[j2\pi \frac{n}{T} (t + \theta_{+1})\right] \right\}^2 + \frac{\mu E_0^2}{2N} J_1^2(b) \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} d_n \exp\left[j2\pi \frac{n}{T} (t + \theta_{-1})\right] \right\}^2,$$

$$I_{\text{RF}}(t) = \frac{2E_0^2 \mu}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(j \frac{2\pi n}{T} \theta_{+1}\right) \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(j \frac{2\pi n}{T} \theta_{-1}\right) \left[\sum_{n=0}^{N-1} d_n \exp\left(j \frac{2\pi n}{T} t\right) \right]^2 \times J_1^2(b) \cos[2\omega_{\text{RF}} t - 2\beta'(\omega_0)z]. \quad (12)$$

从(12)式可以看出,OFDM 信号在光纤传输时,光纤色散只是导致毫米波信号的相位发生了偏转,没有出现 OOK 信号在光纤传输中受到 θ_{+1} 与 θ_{-1} 相移导致的码间串扰。因此 OFDM 在 ROF 系统传输时能够抵抗光纤中的色度色散的影响,延长了传输距离。

3 实验结果分析和比较

3.1 OOK 信号传输

图 1(a)为实现载波抑制后加载 OOK 数据后的实验装置图。由分布式反馈激光器(DFB-LD)发出连续波长为 1543.75 nm 的光信号后,将频率为 10 GHz 的电射频信号经过 1:2 的倍频器后产生重

复频率为 20 GHz 的射频信号,驱动第一个强度调制器(IM),实验中的强度调制器为半波电压 7.8 V 的铌酸锂单臂调制器,调节其偏置电压,实验中将偏置电压设为 7.82 V。光谱仪测得的光谱图如图 1(b)所示,可以看出一阶边带与载波的功率大于 24 dB,因此载波分量可以忽略不计。然后将字节为 $2^{31} - 1$,速率为 2.5 Gb/s 的伪随机序列的 OOK 码加载到另一个铌酸锂调制器(LN-MZM)上,载波分量比一阶边带小 24 dB,因此载波分量可以忽略不计。经过色散系数为 16.75 ps/(nm·km)的单模光纤传输后通过带宽为 60 GHz 的 PIN 结光电二极管(PD)生成重复频率为 40 GHz 的电毫米波信号,经过电放大(EA)后与 40 GHz 的本征信号(LO)混频,通过低通滤波器(LPF)得到解调后的基带信号。86100C 宽带示

波器测量的毫米波和基带信号的眼图如图 2 和图 3 所示。随着光纤传输距离的增大,眼图的宽度逐渐变窄,传输 80 km 时眼图完全闭合,与理论推导一

致。可以看出 OOK 信号在 ROF 系统传输时受到光纤色散和码间干扰的影响,不适合于长距离传输。

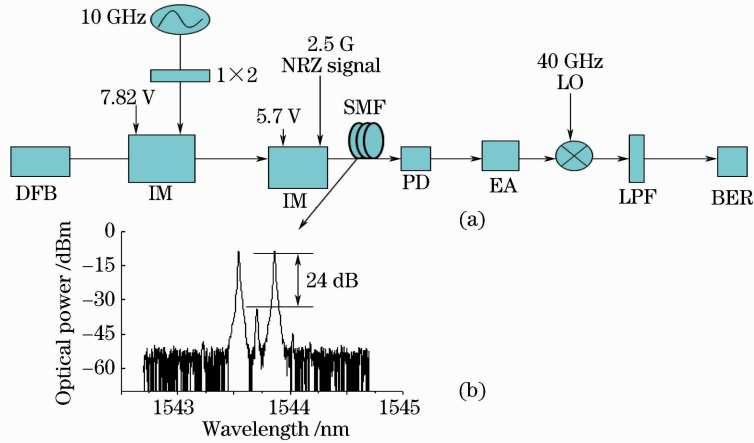


图 1 (a) 传输 OOK 的实验装置图;(b) 加载 OOK 码测得的光谱

Fig. 1 (a) Experimental setup of carrying OOK; (b) measured spectrum with OOK signal

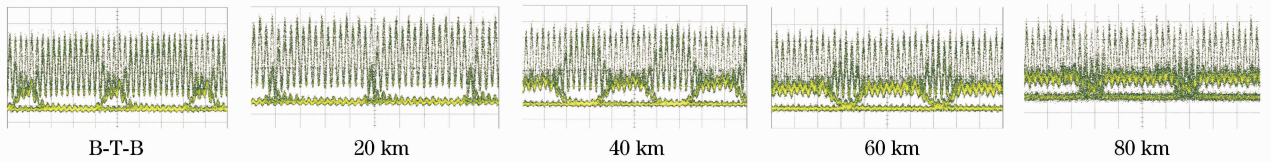


图 2 毫米波信号的眼图

Fig. 2 Eye diagram of millimeter-wave

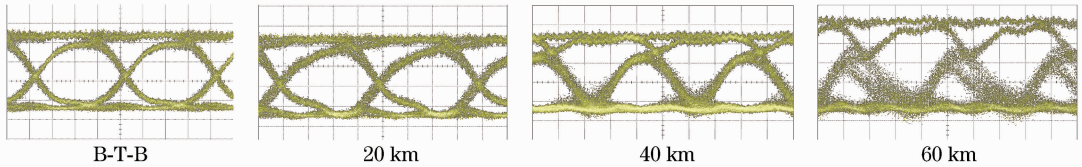


图 3 解调后不同传输距离的基带信号的眼图

Fig. 3 Eye diagram of de-modulated base band signals at different transmitting distances

3.2 OFDM 信号传输

图 4(a)为使用 OFDM 数据信号进行基带调制的实验装置图。调节第一个铌酸锂单臂调制器的偏置电压实现载波抑制产生光载毫米波,然后将 OFDM 数据加载到第二个铌酸锂调制器上。OFDM 信号是由 256 个子载波构成的,其中 200 个子信道用于传输数据,55 个副载波为了过采样置为 0,经过 4QAM 正交相移键控(QPSK)编码后通过 Tektronix 710 任意波发生器产生,然后驱动第二个调制器,实验中将第二个调制器的电压设置为 2.4 V。测量出的光谱图如图 4(b)所示,其中一阶边带分量与载波分量的功率比大于 22 dB。通过光纤传输后经过 3 dB 带宽为 60 GHz 的 PIN 结光电二极管进行拍频,得到重复频率为 40 GHz 的电毫米波,使用电放大器放大后与 40 GHz 的本征信号混频,混频

后通过低通滤波器,滤出基带 OFDM 信号,然后送往标签 TDS-684 的数字示波器中进行采样,采样后的数据处理和恢复在 Matlab 接收程序中离线完成,得到采样后的基带 4QAM 的接收星座图如图 5 所示。当信号在单模光纤传输 50 km 后,毫米波信号受到光纤色散的影响,其相位发生了偏转,星座图发生了一点散乱,但是传输 90 km 时,接收星座图变得清晰了一些,这是由于光纤色散导致的相位偏转恢复了毫米波信号的相位。传输 110 km 和 130 km 时,毫米波信号的相位偏转使得接收星座图相位出现了发散。总体来说,传输 130 km 的星座图与背靠背(B-T-B)相比,接收到的 OFDM 星座图的相位没有发生大的偏转和发散,只是毫米波信号的相位发生了偏移。这说明将 OFDM 信号调制到两个边带时没有发生码间串扰,只是毫米波信号的相位发生了

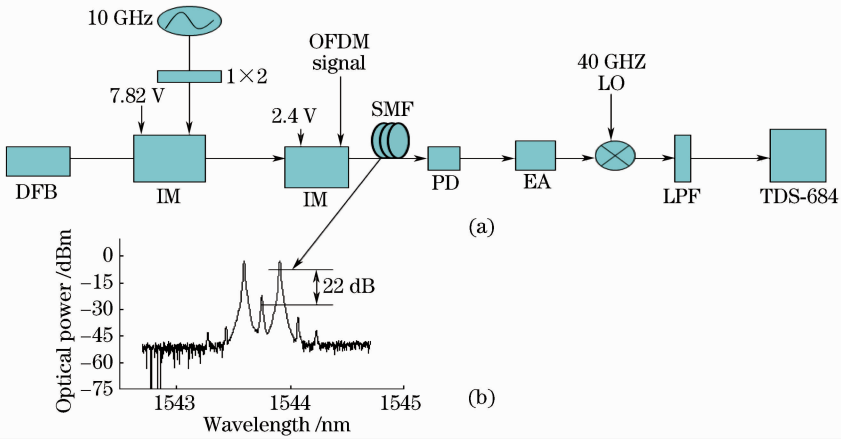


图 4 (a) 传输 OFDM 的实验装置图; (b) 加载 OFDM 信号的光谱

Fig. 4 (a) Experimental setup of carrying OFDM; (b) measured spectrum with OFDM signal

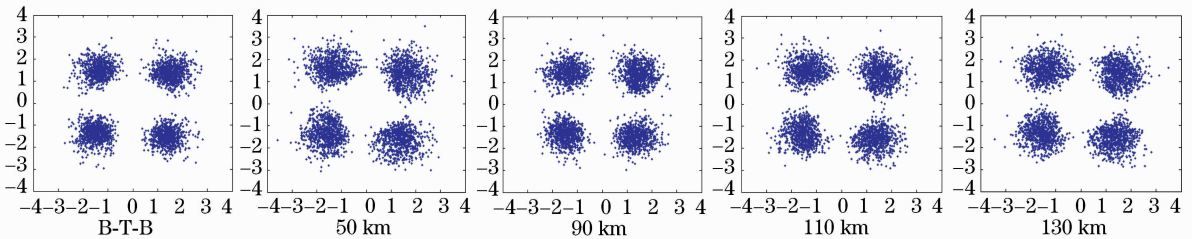


图 5 解调后基带信号不同传输距离的 4QAM 的星座图

Fig. 5 4QAM constellation of demodulated baseband signal at different transmitting distances

偏转,与理论分析吻合。因此 OFDM 信号在 ROF 系统中能够实现长距离传输。

3.3 实验结果比较

图 6 和图 7 分别为 OFDM 和 OOK 信号在光纤传输时的误码率变化曲线图。从图中可以看出, OFDM 信号传输在 10^{-4} 的情况下, 背靠背传输的接收灵敏度为 -20 dBm, 传输 50 km 其功率代价小于 0.1 dB, 传输 130 km 时功率代价仅为 2.5 dB。而使用 OOK 传输 40 km 时其功率代价大于 3 dB。这表明 OFDM 在长距离单模光纤传输中具有抗色散的能力, 功率代价小, 而 OOK 容易受到色度色散的影响。

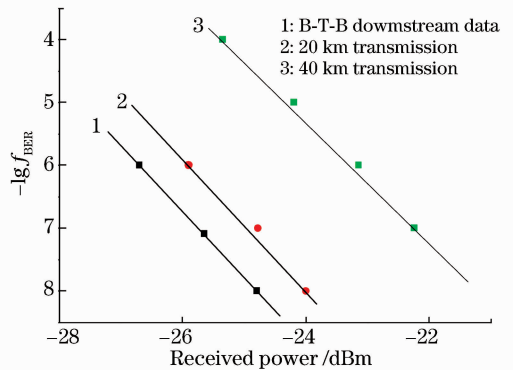


图 7 OOK 码传输的误码率曲线

Fig. 7 BER curves for carrying OOK

响。实验证明, OOK 信号传输 60 km 时, 误码率只能达到 10^{-3} , 而 OFDM 传输 130 km 时星座图仍然很好, 误码率能达到 10^{-4} 。

4 结 论

比较了 OOK 和 OFDM 信号在 ROF 系统中的传输性能。当 OOK 信号调制到两个边带时, 光纤的色散使得边带上的基带分量发生不同的时延, 导致码间干扰的发生, 基带分量发生了衰减。而 OFDM 信号调制到两个边带时, 色散只是导致毫米波的相位发生了偏转, 基带分量并未发生延迟, 因此

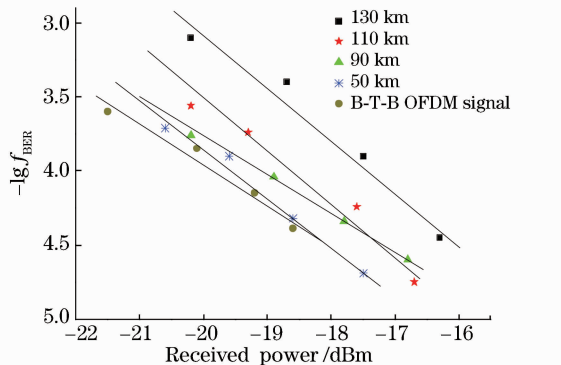


图 6 OFDM 传输的误码率曲线

Fig. 6 BER curves for carrying OFDM

有效地抑制了码间串扰。理论分析和实验结果表明,OFDM 信号的传输性能要比 OOK 信号好,OOK 信号传输 60 km 时,误码率只能达到 10^{-3} ,而 OFDM 传输 130 km 时误码率能达到 10^{-4} 。因此 OOK 信号在光纤传输时容易受到色散的影响,不适用于长距离传输,而 OFDM 信号具有抗色散的能力,在 ROF 系统中能够实现长距离的传输。由于光载毫米波调制的 OFDM 在光纤传输中受到色散的影响发生了相位偏转,需在接收端采用电均衡技术恢复。

参 考 文 献

- Lin Chen, Yufeng Shao, Xiaoyan Lei *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
- Jianjun Yu, Mingfang Huang, Dayou Qian *et al.*. Centralized lightwave WDM-PON employing 16-QAM intensity modulated OFDM downstream and OOK modulated upstream signal [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(18):1545~1547
- Lin Chen, Hong Wen, Shuangchun Wen. A radio-over-fiber system with a novel scheme for millimeter-wave generation and wavelength for up-link connection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(19):2056~2058
- Jianjun Yu, Zhensheng Jia, Lilin Yi *et al.*. Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1):265~267
- Lin Chen, Shuangchun Wen, Ying Li *et al.*. Optical front-end to generate optical millimeter-wave signal in radio-over-fiber system with different architectures [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(11):3381~3387
- Hong Wen, Lin Chen, Cheng Huang *et al.*. A full-duplex radio-over fiber system using direct modulation laser to generate optical millimeter wave and wavelength reuse for uplink connection [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(1):2083~2088
- Zhensheng Jia, Jianjun Yu, Arshad Chowdhury *et al.*. Simultaneous generation of independent wired and wireless services using a single modulator in millimeter-wave-band radio-over-fiber system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(20):1691~1693
- Andreas Wiberg, Pere Perez-Millán, Miguel V. Andres *et al.*. Fiber-optic 40-GHz mm-wave link With 2. 5-Gb/s data transmission [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(9): 1938~1940
- Zhensheng Jia, Jianjun Yu, Gee-Kung Chang. A full-duplex radio-over-fiber system based on optical carrier suppression and reuse [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(16):1726~1728
- 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
- Hu Liliang, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. A novel scheme for optical millimeter-wave generation based on double-sideband modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2):238~242
胡黎亮,陈林,余建军等.一种改进的双边带调制产生毫米波的方案[J].光学学报,2008,**28**(2):238~242
- Zhensheng Jia, Jianjun Yu, Georgios Ellinas *et al.*. Key enabling technologies for optical-wireless networks: optical millimeter-wave generation, wavelength reuse, and architecture [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(11):3452~3471
- Huang Cheng, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. Millimeter-wave generation utilizing one phase modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1):73~76
黄诚,陈林,余建军等.采用单个相位调制器产生毫米波[J].中国激光,2008,**35**(1):73~76
- Hong Wen, Lin Chen, Cheng Huang *et al.*. A full-duplex radio-over fiber system using direct modulation laser to generate optical millimeter wave and wavelength reuse for uplink connection [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(1):2083~2088
- Jianxing Ma, Jianjun Yu, Chongxiu Yu *et al.*. The influence of fiber dispersion on the code form of the optical mm-signal generated by single sideband intensity modulation [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **8**(8):1~8
- Jianxin Ma, Jianjun Yu, Chongxiu Yu *et al.*. Transmission performance of the optical mm-wave generated by double-sideband intensity modulation [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **280**(1):317~326
- Jianxin Ma, Chongxiu Yu, Zhen Zhou *et al.*. Optical mm-wave generation by using external modulator based on optical carrier suppression [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **268**(1):51~57