

文章编号: 0258-7025(2009)04-0889-06

一种新型的单边带调制技术

雷小燕 董泽 皮雅稚 陈林 余建军 文双春

(湖南大学计算机与通信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 从理论和实验两方面研究了一种新型单边带调制(SSB)技术,通过在中心站合适设置单臂强度调制器的偏置电压,使调制器产生的奇数边带被抑制,采用滤波器滤除其中的一个二阶边带,即可产生单边带信号。用该新型的单边带调制技术产生的光毫米波理论上可以传输 148 km。同时搭建了实验系统,采用 10 GHz 的本振信号源与 2.5 Gbit/s 的数字信号混频后驱动单臂强度调制器产生抑制奇数边带的调制信号,再通过一个滤波器得到 20 GHz 的单边带毫米波,还得到了不同载波边带比(CSR)情况下的毫米波眼图。通过实验分析不同载波边带比对传输性能的影响,发现载波边带比为 0 dB 时,传输性能最佳。

关键词 光纤光学; 光纤无线通信; 载波边带比; 单边带调制; 光毫米波

中图分类号 TN929.9 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0889

Performance of a Novel Scheme to Generate Single-Sideband Millimeter-Wave Signals

Lei Xiaoyan Dong Ze Pi Yazhi Chen Lin Yu Jianjun Wen Shuangchun

(Key Laboratory for Micro/Nano Opto-Electronic Devices of Ministry of Education,
School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract A novel scheme to generate optical millimeter-wave (mm-wave) signals by using single-sideband (SSB) modulation technique was proposed and experimentally demonstrated. Odd order sidebands were suppressed by proper adjusting the direct current (DC) bias of signal-arm intensity external modulator in central station. One of the second order sidebands was filtered out and SSB modulation was realized. The mm-wave generated by SSB modulation can be transmitted over 148 km in theory. In experiment, a 2.5 Gbit/s data and an 10 GHz RF clock were mixed. The mixed signals were applied to drive a single-arm intensity modulator to generate 40 GHz double sideband signals. Then a filter is used to get a 20 GHz SSB signal. The effect of optical carrier-to-sideband ratio (CSR) on downstream transmission in radio-over-fiber (ROF) system was analyzed and the performance of the ROF system can be significantly improved when CSR is 0 dB.

Key words fiber optics; radio-over-fiber; carrier-to-sideband ratio; single sideband; optical millimeter wave

1 引言

光纤-无线接入技术(ROF)利用光纤传输毫米波段无线信号,充分发挥了光纤通信的超宽带和无线移动通信的高度灵活特性,无疑将在新一代宽带无线接入技术中扮演重要的角色^[1~2]。

全光毫米波产生技术是 ROF 系统的关键技术

之一,目前为止,已提出多种光毫米波的产生方法^[1~15]。基于外部调制器的光毫米波产生方案最简单,最实用,因而最有可能成为 ROF 系统中产生光毫米波的首选方案。外调制器产生毫米波光载波有三种工作方式,双边带调制(DSB)^[4,5]、单边带调制(SSB)^[6,7]和载波抑制调制(OCS)^[12,13]。双边带

收稿日期: 2008-05-13; 收到修改稿日期: 2008-07-11

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z263); 湖南省自然科学基金(06JJ50108), 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。

作者简介: 雷小燕(1983-),女,硕士研究生,主要从事光纤无线通信系统方面的研究。

E-mail: xiaoyan99yy@yahoo.com.cn

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等方面的研究(通信联系人)。

调制配置简单,但产生的光毫米波由于光纤色散的影响,传输距离受限。为了延长毫米波信号在光纤中的传输距离,单边带调制是一个很好的选择。但是目前所提出的单边带调制产生毫米波信号的频率等于中心站的射频(RF)信号源的频率,因此所需要的调制器带宽也比较宽。

本文提出一种新型的单边带调制技术,在中心站用一个单臂强度调制器实现抑制奇数边带,产生频率间隔为2倍射频信号源频率的双边带信号,再用一个滤波器滤除其中的一个二阶边带,实现单边带调制。这样可以产生频率为两倍射频频率的毫米波信号,降低了对调制器带宽的要求。

2 ROF 系统模型和理论分析

采用新型单边带调制技术的 ROF 系统原理如图 1 所示(CSR 为载波边带比)。由分布反馈式激光器(DFB-LD)产生连续波激光作为光载波,下行链路的基带数字信号与频率为 f_0 的射频信号混频。混频后的信号驱动单电极光强度调制器(IM),通过合适地设置调制器的偏置电压,可以抑制奇数阶边带。再用一个光纤布拉格光栅(FBG)滤除双边带信号的其中一个二阶边带,完成单边带调制。此时中心载波与剩下的一个二阶边带频率差为2倍射频信号频率。在基站,中心载波与剩下的二阶边带在光电探测器(O/E)处拍频产生2倍射频信号频率的电毫米波信号。用该方案 10 GHz 的本振信号源与 2.5 Gbit/s 的数字信号混频后,驱动单臂强度调制器,合适设置单臂强度调制器的偏置电压,使调制器进行奇数边带抑制调制。那么产生的一阶边带就被抑制,再用滤波器滤除一个二阶边带。在基站中通过光电二极管(PD),一个二阶边带跟中心载波拍频产生 20 GHz 的毫米波信号。

分布反馈式激光器产生线宽很窄的连续光波,表示为 $E_0(t) = E_0 \cdot \exp(j\omega_0 t)$,其中 E_0, ω_0 分别为光载波的幅度与角频率。基带数字信号 $S(t)$ 和射频信号 $V_{RF}(t) = V_{RF} \cos \omega_{RF} t$ 混频,其中, V_{RF}, ω_{RF} 分别为射频信号的幅度与角频率。混频后的信号 $V(t) = V_{RF}(t) \cdot S(t) = V_{RF} \cdot \cos \omega_{RF} t \cdot S(t)$ 驱动外强度调制器。从铌酸锂调制器(LiNbO₃ Mach-Zehnder Modulator; LN-MZM)输出的光信号的表达式为^[14]

$$E_{out1}(t) = \frac{E_0(t)}{10^{\ln/20}} \left\{ \gamma \cdot \exp \left[j\pi \frac{V_2(t)}{V_\pi} + j\pi \frac{V_{bias2}}{V_\pi} \right] + (1 - \gamma) \cdot \exp \left[j\pi \frac{V_1(t)}{V_\pi} + j\pi \frac{V_{bias1}}{V_\pi} \right] \right\}, (1)$$

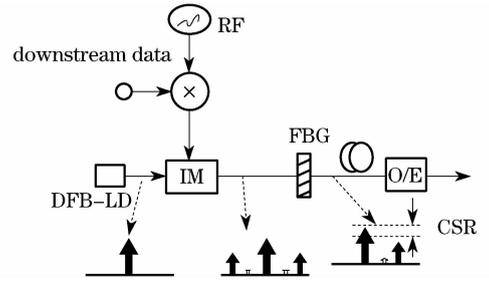


图 1 采用新型单边带调制技术的 ROF 系统原理
Fig. 1 Principle diagram of novel single sideband modulation in ROF system

其中 $V_1(t), V_2(t)$ 分别为加在 LN-MZM 两臂上混频后的电信号,幅度相同,相位相差 θ ,即 $V_1(t) = V_{RF} \cdot S(t) \cdot \cos \omega_{RF} t, V_2(t) = V_{RF} \cdot S(t) \cdot \cos(\omega_{RF} t + \theta); V_{bias1}, V_{bias2}$ 为加到两臂的直流偏置电压; V_π 为调制器的半波电压; $\gamma = 1/2(1 - 1/\sqrt{\epsilon_\gamma})$, 为分光比,其中 $\epsilon_\gamma = 10^{R/10}, R$ 为消光比。设消光比足够大, \ln 为插入损耗,设插入损耗足够小。为了简化分析,令 $V_{bias2} = 0$,对(1)式进行简化,并取其实部,得

$$E_{out1} = E_0/2 \left\{ \cos \left[\omega_0 t + \frac{\pi V_{RF} S(t)}{V_\pi} \cos(\omega_{RF} t + \theta) \right] + \cos \left[\omega_0 t + \frac{\pi V_{RF} S(t)}{V_\pi} \cos(\omega_{RF} t) + \frac{\pi V_{bias1}}{V_\pi} \right] \right\}, (2)$$

令式中 $\pi V_{RF}/V_\pi = \beta$ 表示调制深度,令 $\beta' = \pi V_{RF} S(t)/V_\pi = \beta S(t), \varphi = \pi V_{bias1}/V_\pi$,表示由直流偏置电压引起的相位偏转。将(2)式进行贝塞耳展开,得

$$E_{out1} = E_0/2 \left\{ \cos \omega_0 t \left\{ J_0(\beta') + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\beta') \cdot [\cos(2n\omega_{RF} t) \cos(2n\theta) - \sin(2n\omega_{RF} t) \sin(2n\theta)] \right\} + 2 \sin \omega_0 t \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\beta') \{ \cos[(2n-1)\omega_{RF} t] \cdot \cos[(2n-1)\theta] - \sin[(2n-1)\omega_{RF} t] \sin[(2n-1)\theta] \} + \cos(\omega_0 t + \varphi) \left[J_0(\beta') + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\beta') \cos(2n\omega_{RF} t) \right] + 2 \sin(\omega_0 t + \varphi) \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\beta') \cos[(2n-1)\omega_{RF} t] \right\} \right\} \right\}, (3)$$

式中 $J_k(k=0, 1 \dots 2n)$ 表示第一类 k 阶 Bessel 函数,当 $\theta = \pi, \varphi = 0$ 时, $\sin 2n\theta = 0, \sin(2n-1)\theta = 0$, 奇数

边带消失,(3)式可简化为

$$E_{\text{out1}} = E_0 \left[\cos(\omega_0 t) J_0(\beta') + 2 \cos(\omega_0 t) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\beta') \cos(2n\omega_{\text{RF}} t) \right]. \quad (4)$$

当调制深度很小时,忽略二阶以上边带,(4)式化简为

$$E_{\text{out1}}(t) = E_0 J_0(\beta') \cos \omega_0 t - E_0 J_2(\beta') \cos(\omega_0 t + 2\omega_{\text{RF}} t) - E_0 J_2(\beta') \cos(\omega_0 t - 2\omega_{\text{RF}} t), \quad (5)$$

(5)式的第一项为中心载波,第二、三项为双频二阶光边带。抑制了奇数阶边带的双边带信号再通过一个光纤布拉格光栅进行滤波,滤除二阶下边带,并同时滤掉一部分中心载波,滤波后输出的信号为

$$E_{\text{out2}}(t) = r E_0 J_0(\beta') \cos \omega_0 t - E_0 J_2(\beta') \cos(\omega_0 t - 2\omega_{\text{RF}} t), \quad (6)$$

其中 r 是光纤布拉格光栅的反射率。此信号经光纤传输到基站,在基站经过光电二极管进行光电检测,光电检测器的输出为

$$I(t) = \mu \cdot |E_{\text{out2}}(t)|^2 = \frac{1}{2} r^2 \mu \cdot E_0^2 \cdot J_0^2(\beta') + \frac{1}{2} \mu \cdot E_0^2 \cdot J_2^2(\beta') + \frac{1}{2} r^2 \mu \cdot E_0^2 \cdot J_0^2(\beta') \cdot \cos 2\omega_0 t + \frac{1}{2} \mu \cdot E_0^2 \cdot J_2^2(\beta') \cos 2(\omega_0 - 2\omega_{\text{RF}})t - r\mu \cdot E_0^2 \cdot J_0(\beta') J_2(\beta') [\cos(2\omega_0 t - 2\omega_{\text{RF}} t) + \cos(2\omega_{\text{RF}} t)]. \quad (7)$$

从 PD 输出电毫米波为

$$I(t) = -r\mu \cdot E_0^2 \cdot J_0(\beta') J_2(\beta') \cos(2\omega_{\text{RF}} t). \quad (8)$$

从(8)式可以看出接收端对基带数字信号的接收能力取决于载波功率 [P_C 正比于 $r E_0 J_0(\beta')$] 和边带功率 [P_S 正比于 $E_0 J_2(\beta')$] 的乘积。定义载波边带比为中心载波功率与二阶上边带功率之比。系统链路中的灵敏度取决于中心载波功率和二阶边带功率之和。在给定的接收光功率情况下,中心载波和二阶边带功率就会随着载波边带比的变化而相应增大/减小或减小/增大,来维持总的接收光功率不变。那么当载波边带比变化的时候,接收端所接收到的基带数字信号(取决于 $P_C P_S$ 的积)就会在载波边带比为 0 dB(中心载波与二阶边带功率相等)时出现最大值。因此载波边带比为 0 dB 时会有低的误码率,系统的性能也会大大改善。

色散是限制光毫米波传输距离的主要因素。由于色散不同传输速度的信号经光纤传输后产生不同的延时,造成码元时移,当时移时间等于一个码元周

期 τ 时,眼图将完全闭合^[15]。本文中心载波和二阶上边带的传输速度分别为 $v_0 = \omega_C / \beta(\omega_C)$, $v_{-2} = (\omega_C - 2\omega_{\text{RF}}) / \beta(\omega_C - 2\omega_{\text{RF}})$, 则经过 Z 距离传输后,两个边带的时延差为

$$\Delta t_{-2,0} = \left[\frac{\beta(\omega_C - 2\omega_{\text{RF}})}{\omega_C - 2\omega_{\text{RF}}} - \frac{\beta(\omega_C)}{\omega_C} \right] \cdot Z, \quad (9)$$

将 $\beta(\omega_C \pm k\omega_{\text{RF}}) = \beta(\omega_C) \pm k\omega_{\text{RF}} \beta'(\omega_C) + \frac{1}{2} k^2 \omega_{\text{RF}}^2 \beta''(\omega_C)$ 的泰勒展开式,和 $\beta'(\omega_C) = \lambda_C^2 D / -2\pi c$ 代入(9)式,并进行化简,得

$$\Delta t_{-2,0} \approx 2D\lambda_C^2 f_{\text{RF}} Z c^{-1}, \quad (10)$$

此即为传输 Z 距离后,中心载波与二阶上边带的时延差。当 $\Delta t_{-2,0} \rightarrow \tau$ 时,眼图完全闭合。因此,系统的传输距离: $z < L = \frac{\tau \cdot c}{2 \cdot D \cdot \lambda_C^2 \cdot f_{\text{RF}}}$ 。本系统采用 NRZ 码,并且数字信号速率为 2.5 Gbit/s,因此 $\tau = 0.4$ ns。将色散参数 $D = 17$ ps/(nm · km),中心波长 $\lambda_C = 1544.1$ nm, $f_{\text{RF}} = 10$ GHz 代入上式,得到最大传输距离 $L = 148$ km。根据(10)式,码元时移与传输距离 z 成正比,随着传输距离的增加,眼图将逐渐闭合。

采用 20 GHz 本振信号驱动双臂光强度调制器产生单边带信号^[6,7],在接收端将一阶边带和中心载波拍频产生 20 GHz 的毫米波信号时,中心载波和一阶边带经过 Z 距离的传输,产生的时间差为: $\Delta t_{-1,0} \approx D\lambda_C^2 f_{\text{RF}} Z c^{-1}$,其中 $f_{\text{RF}} = 20$ GHz。当参数 D 与 λ_C 的取值与本文取值相同时,可得到 $\Delta t_{-1,0} = \Delta t_{-2,0}$ 。而本文采用的本地振荡信号只有 10 GHz,同时降低了调制器的带宽需求,降低了系统的成本,是一种高效的毫米波调制方案。

3 实验与结果

采用新型单边带调制技术的 ROF 系统实验装置如图 2 所示。其中, TLD 为可调谐激光器,本实验中采用 Ando 公司 6317B 的光谱分析仪检测光的频谱,其波长范围为 600~1700 nm,最小分辨率为 0.01 nm。利用 HP Agilent 86100C 示波器测量眼图。下行链路数字信号由型号为 Anritsu MP1763C 的码型发生器产生,采用字长为 $2^{31} - 1$,速率为 2.5 Gbit/s 的数字信号。RF 信号是 HP Agilent 公司 E8257D 模拟信号发生器产生的 10 GHz 频率信号。下行链路 2.5 Gbit/s 的基带数字信号通过电混频器(MIX)与 10 GHz 的射频信号进行混频。混频后的信号经过电放大器(EA)放大后驱动单臂外部强

度调制器,此时电放大器偏置电压为 10.7 V。采用 3 dB 带宽大于 8 GHz,半波电压为 5.8 V,消光比大于 25 dB 的单臂 LiNbO₃ 调制器。为了产生抑制奇数边带的双边带信号,将调制器的直流偏置电压设置在其输出功率最大点。调制器的偏置电压为 3.9 V,此时可产生抑制奇数边带的双边带信号,双边带调制信号的光谱包括中心载波和二阶边带,如图 2 内插图所示。其他边带功率相比中心载波和二阶边带功率低得多,所以可忽略不计。抑制了奇数边带的双边带信号,经过光环行器(OC)和带宽为 0.244 nm 的布拉格光纤光栅(FBG)分离出一个二阶边带。由此产生单边带信号,再通过标准单模光纤(SMF-28)传输到基站。在基站光毫米波信号经过一个掺铒光纤放大器(EDFA1)进行预放大,再通过带宽为 0.5 nm 的可调谐光滤波器(TOF)进行滤波,抑制光放大后引入的自发辐射噪声。光毫米波最后通过 3 dB 带宽为 50 GHz 的高速光电探测器(PIN)变成电毫米波。

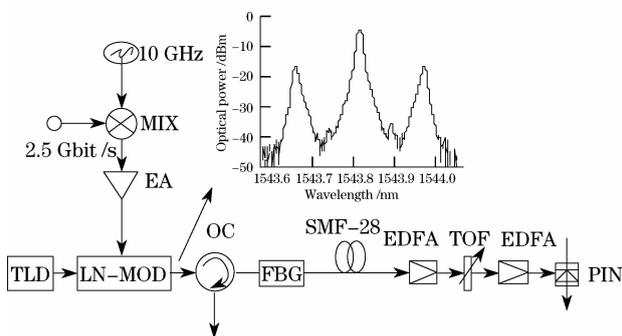


图 2 新型单边带调制技术的 ROF 系统实验装置
插图为奇数边带抑制后的频谱图

Fig. 2 Experimental setup for novel single sideband modulation in ROF system. Illustration: optical spectrum after suppressing odd order sidebands

图 3 是不同光波长情况下,经过光纤光栅后用光谱仪测得的不同载波边带比的光谱图。图 4~6 分别是载波边带比为 7 dB, 0 dB, -10 dB 时,不同传输距离下在光电探测器后测得的电毫米波信号眼图。从眼图中明显发现,当载波边带比从 7 dB 经 0 dB 变化到 -12 dB 时,眼图中的 0 线明显下移。这主要是因为当载波边带比为 7 dB 时,接收端接收到的中心载波功率很高,因而消光比较低,0 线上移。当载波边带比慢慢下降到 0 dB 或 -12 dB 时,相应的载波功率降低,消光比上升,所以 0 线的位置慢慢下移。以致当载波边带比为 -12 dB 时,眼图中的 0 线和携带毫米波信号的 1 线完全分离。通过对比图 4, 5, 6 中(a), (b), (c), (d)还可以发现光纤

中的损耗对不同载波边带比情况下产生的光毫米波影响不同,随着传输距离的增加,光毫米波受损耗的影响增加,主要体现在毫米波幅度的降低。通过对比相同载波边带比不同传输距离的毫米波眼图发现,传输距离越远,光毫米波信号的幅度就会越低,这会导致接收端接收功率的下降。当接收端接收功率低于一定数值时,接收端不能再检测到信号。载波边带比为何值时系统性能最佳,取决于中心载波与二阶边带功率的相互作用。本系统链路中的灵敏度取决于中心载波功率(P_C)和二阶边带功率(P_S)之和,同时接收端的误码率(BER)取决于中心载波与二阶边带功率之积的平方根($\sqrt{P_C P_S}$)。也就是说接收端对基带数字信号的接收能力跟 $\sqrt{P_C P_S}$ 成正比。那么在给定的接收光功率情况下,中心载波和二阶边带功率就会随着载波边带比的变化而相应增大/减小或减小/增大,来维持总的接收光功率不变。当载波边带比变化的时候,接收端所接收到的基带数字信号(正比于 $\sqrt{P_C P_S}$)就会在载波边带比为 0 dB 时出现最大值。因此载波边带比为 0 dB 时会有低的误码率,系统的性能也会大大改善。但是由于实验中测得的载波边带比组数不多,所以不同的载波边带比对系统性能的影响不是很明显。通过对比相同传输距离下不同载波边带比的电毫米波眼图,还是可以发现当载波边带比为 0 dB 时,1 线上的毫米波信号要明显强于其他载波边带比的情况。从本实验所得的电毫米波信号眼图也可以发现,新型单边带调制技术产生的光毫米波信号,在光纤链路中传输时可以抵抗光纤色散对其的影响。系统产生的光毫米波信号传输 60 km 后眼图还是很清晰。

4 结 论

本文提出的新型单边带调制技术,可以用较低频率的射频信号产生较高频率(两倍射频信号频率)的毫米波信号,并降低中心站强度调制器的带宽要求。经滤波器滤除的二阶边带还可以再利用,降低系统造价。分析了不同的载波边带比对此新型单边带调制技术产生的光毫米波信号性能的影响,发现载波边带比为 0 dB 时,系统性能最佳。这主要是由光载波功率与边带功率之间的相互作用引起的。接收端所能接收到的最低光功率与光载波功率和边带功率之和有关,而接收端的误码率与两者之积的平方根成正比。所以在给定接收光功率的情况下,载波功率和边带功率分别随着载波边带比的变化而增

大/减小或减小/增大变化,来维持总的接收光功率不变,那么接收端的误码率正比于两者之积的平方根,就在载波边带比为 0 dB 时,出现最大值。也就是说,在载波边带比为 0 dB 时,系统性能最佳。新

型单边带调制技术,还可以延长毫米波信号的传输距离,理论上可以传输 148 km,实验中传输 60 km 后电毫米波信号性能仍很好。

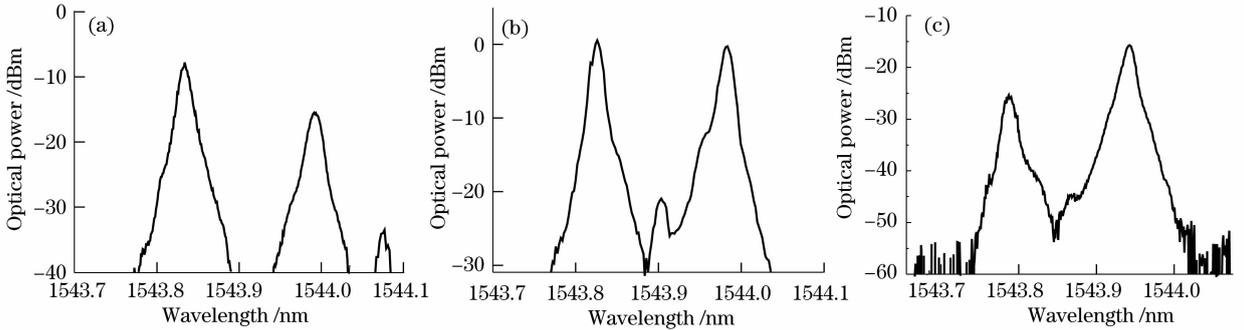


图 3 载波边带比为 7 dB,0 dB,-10 dB 时的光谱图

Fig. 3 Optical spectra of different CSR. (a) 7 dB; (b) 0 dB; (c) -10 dB

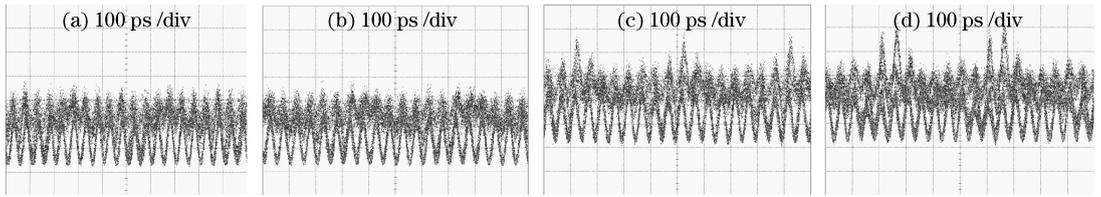


图 4 CSR 为 7 dB 时不同传输距离下电毫米波信号的眼图。(a) back to back; (b) 20 km; (c) 40 km; (d) 60 km

Fig. 4 Electrical millimeter wave eye diagrams when CSR is 7 dB. (a) BTB; (b) after transmitted over 20 km (c) after transmitted over 40 km; (d) after transmitted over 60 km

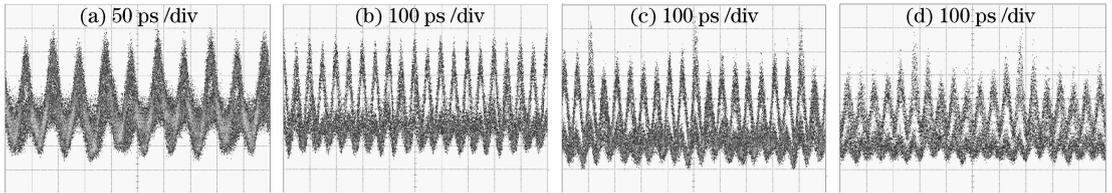


图 5 CSR 为 0 dB 时不同传输距离下电毫米波信号的眼图。(a) back to back; (b) 20 km; (c) 40 km; (d) 60 km

Fig. 5 Electrical millimeter wave eye diagrams when CSR is 0 dB. (a) BTB; (b) after transmitted over 20 km; (c) after transmitted over 40 km; (d) after transmitted over 60 km

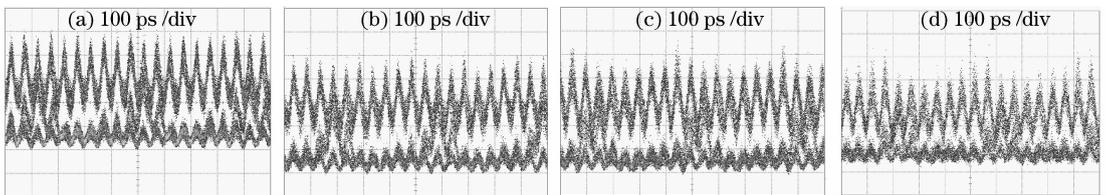


图 6 CSR 为 -10 dB 时不同传输距离下电毫米波信号的眼图。(a) back to back; (b) 20 km; (c) 40 km; (d) 60 km

Fig. 6 Electrical millimeter wave eye diagrams when CSR is -10 dB. (a) BTB; (b) after transmitted over 20 km; (c) after transmitted over 40 km; (d) after transmitted over 60 km

参 考 文 献

1 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
 2 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
 3 Ye Qing, Liu Feng, Qu Ronghui *et al.*. Fiber-communication project of millimeter-wave subcarrier based on fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1464~1468
 叶青,刘峰,瞿荣辉等.一种基于光纤光栅的毫米波副载波

- 光纤通信方案[J]. 光学学报, 2006, **26**(10):1464~1468
- 4 Yu Jianjun, Jia Zhensheng, Xu Lei *et al.*. DWDM optical millimeter-wave generation for radio-over-fiber using an optical phase modulator and an optical interleaver[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(13):1418~1420
 - 5 Chen Lin, Wen Hong, Wen Shuangchun. A radio-over-fiber system with a novel scheme for millimeter-wave generation and wavelength reuse for up-link connection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(19):2056~2058
 - 6 G. H. Smith, D. Novak, Z. Ahmed. Overcoming chromatic dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators[J]. *IEEE Trans. Micro. Thy. Tech.*, 1997, **45**: 1410~1415
 - 7 Ma Jianxin, Yu Jianjun, Yu Chongxiu *et al.*. The influence of fiber dispersion on the code form of the optical mm-wave signal generated by single sideband intensity-modulation [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **271**:396~403
 - 8 Yu Jianjun, Jia Zhenzheng, Yi Lilin *et al.*. Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulators[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1):265~267
 - 9 Chen Lin, Pi Yazhi, Wen Hong *et al.*. All-optical mm-wave generation by using direct-modulation FBD laser and external modulation[J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2006, **49**: 1265~1267
 - 10 Chen Lin, Dong Ze, Li Ying *et al.*. Full-duplex radio-over-fiber system with a novel scheme for millimeter-wave generation by single arm modulator[J]. *Journal on Communications*, 2007, **28**(9): 85~90
 - 11 Chi Hao, Zhang Xianmin, Shen Linfang. Inter-modulation distortion analysis for single-drive Mach-Zehnder modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11):1619~1622
 - 12 Ma Jianxin, Yu Chongxiu, Zhou Zhen *et al.*. Optical mm-wave generation by using external modulator based on optical carrier suppression[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **268**:51~57
 - 13 Jia Zhenzheng, Yu Jianjun, G. K. 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
 - 14 J. C. Cartledge. Performance of 10 Gb/s lightwave systems based on lithium niobate Mach-Zehnder modulators with asymmetric Y-branch waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(9):1090~1092
 - 15 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