

单边带光纤承载射频系统的性能改进研究

刘香玲 刘增基 李建东 岳 鹏

(西安电子科技大学综合业务网关键技术与理论国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要 在光纤承载射频(RoF)系统中,针对普通单边带信号中光载波分量和光边带分量之间功率差较大的问题,提出了一种利用集成马赫-曾德尔调制器(MZM)生成单边带信号的改进方法。通过调节该集成 MZM 中直流臂上的直流偏压,对于任意调制指数,单边带信号中两个分量的功率都能够平衡,即得到最优的 0 dB 载边比(CSR)。理论分析了集成 MZM 处于不同损耗状态时载边比的变化情况。仿真结果证实了在不同损耗状态下调节直流偏压可以使单边带信号中光载波和光边带的功率平衡。仿真结果还表明,当集成 MZM 中的直流偏压偏离最佳值时,如果将偏压漂移控制在 5% 范围内,RoF 系统具有较好的稳定性。

关键词 光通信;光纤承载射频;集成马赫-曾德尔调制器;单边带调制;载边比

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0606003

Performance Improvement of Optical Single Sideband with Carrier Signals in Radio over Fiber System

Liu Xiangling Liu Zengji Li Jiandong Yue Peng

(State Key Laboratory on Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract An improved method to generate optical single sideband with carrier (OSSB+C) signals is proposed based on the integrated Mach-Zehnder modulator(MZM) in the radio over fiber (RoF) system, avoiding the great difference of the power of optical carrier and that of optical sideband using the conventional OSSB+C modulation. By adjusting the direct current voltage applied in the direct current arm of the integrated MZM, the balanced power of the optical carrier and optical sideband is obtained for any modulation index, i. e. the optimum carrier-to-sideband ratio (CSR) value of 0 dB is achieved. The variation of CSR is then analyzed theoretically under different loss states of the integrated MZM. It is verified by the simulation results that adjusting the direct current voltage can make the power of optical carrier and that of optical sideband balanced. The simulation results also show that when the direct voltage deviates from the optimum value in the integrated MZM, the RoF system based on the proposed technique has better robustness if the bias drift is controlled within the range of 5%.

Key words optical communications; radio over fiber; integrated Mach-Zehnder modulator; optical single sideband with carrier modulation; carrier to sideband ratio

OCIS codes 060.4080; 060.5625; 060.4510

1 引 言

随着用户对多媒体等数据业务的需求日益增长,未来无线通信必将朝着大容量高速率方向发展,通信频段将会延伸到毫米波段。但是受毫米波传输特性的限制,毫米波信号在金属导线或大气中传输时衰减很大。光纤承载射频(RoF)技术以光纤为载

体传播微波信号,集中了光纤通信的长距离低损耗传输和无线通信的灵活可移动的优势,是近年来发展起来的一种传输接入技术^[1,2]。

光学方式产生毫米波信号是 RoF 系统的关键技术之一。迄今为止,已提出的光毫米波信号的产生方式有很多种^[3~18],其中通过外调制器获得单边

收稿日期: 2010-11-23; **收到修改稿日期**: 2011-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(60902038)和 ISN 国家重点实验室自主研究课题项目资助课题。

作者简介: 刘香玲(1982—),女,博士研究生,主要从事光纤无线通信技术方面的研究。E-mail: xllu1982@yahoo.com.cn

导师简介: 李建东(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事宽带移动自组织网络方面的研究。

E-mail: jdli@mail.xidian.edu.cn

带(OSSB+C)光毫米波信号的做法备受青睐。单边带信号有很多优点,例如不受周期性传播衰落效应的影响,信道带宽只有普通强度调制信号带宽的一半,以及容易应用到波分复用的 RoF 系统中等^[8~11]。但是,通过单边带调制产生的光毫米波信号中的光载波分量过大,光载波和光边带的功率之差,即载边比(CSR),高达 20 dB,导致光接收恢复出的电信号中直流部分占了很大的比重,整个系统的光接收灵敏度较低。有研究指出,减小单边带信号的载边比可以提高光接收机灵敏度,并且当载边比为 0 dB 时,光接收灵敏度达到最高^[12]。因此,研究者们通过部分抑制光载波或放大光边带来提高 CSR。这些技术包括使用光纤布拉格光栅(FBG)抑制掉部分光载波分量^[13,14]、利用受激布里渊散射(SBS)效应提高光边带的功率^[15]、或者用半导体放大器(SOA)使光边带获得比光载波更大的放大量^[16]。但是,这些方法或者需要复杂的控制系统,增加了系统的复杂性,或者射频频率的应用范围受限。文献[17]中利用基于多模干涉(MMI)耦合器的集成马赫-曾德尔调制器(MZM)来产生具有较理想载边比的光单边带信号,但是当调制指数较小时,并不能达到最优的 0 dB 载边比。

本文提出了一种利用集成 MZM 实现光单边带调制的方法。通过调整集成 MZM 中直流臂上的直流偏压,对于任意调制指数,均可达到最优 0 dB 载边比,系统性能得到提高。然后分析讨论了集成 MZM 的损耗状态和直流偏压漂移对单边带信号载边比以及接收灵敏度的影响。

2 单边带调制器模型

本文提出的基于集成 MZM 的改进光单边带的实现方法如图 1 所示。集成 MZM 由 3 个相位调制器(PM)构成,上面的两个 PM 组成一个普通的双臂 MZM 用以实现传统意义上的光单边带调制,称之为子 MZM。两个 PM 调制臂之间的直流偏置为 $V_\pi/2$,其中 V_π 是 PM 的半波电压。施加在两个调制臂上的射频(RF)信号的相位差为 $\pi/2$ 。这两个调制臂输出的信号叠加在一起生成的单边带信号如图 1 所示,具有普通单边带调制光毫米波信号的特点——光载波分量过大。第 3 个调制臂只对通过的光载波产生一个附加相位 θ ,而不进行任何调制。当第 3 个调制臂中的光载波分量同上面两个 PM 产生的单边带信号叠加在一起时,只要附加相位 θ 选择合适的值,就可以降低光载波分量的功率,最终从

集成 MZM 输出的光信号如图 1 所示,因此达到优化 CSR 的目的。

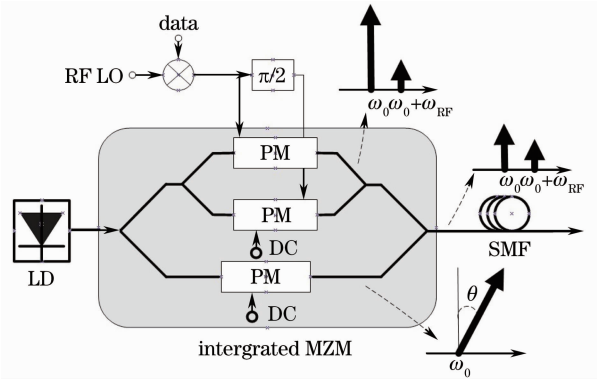


图 1 改进的单边带信号的实现方法

Fig. 1 Improved generation methods of the optical single sideband with carrier signals

设从激光器输出的连续光波为 $E_0 \exp(j\omega_0 t)$, E_0 和 ω_0 分别是光载波的振幅和角频率。驱动两个 PM 调制臂的 RF 本振信号分别表示为 $V_{RF} \cos(\omega_{RF} t)$ 和 $V_{RF} \cos(\omega_{RF} t + \pi/2)$,其中 V_{RF} 是每路 RF 信号的振幅, ω_{RF} 为 RF 信号的角频率。图 1 中两个 MZM 的分光比/合波比均是 0.5, α 是子 MZM 的插入损耗。在集成 MZM 的合波器处,从子 MZM 输出的单边带信号与从第 3 个调制臂输出的光载波进行叠加,表达式为

$$E_{MZM}(t) = E_{s-MZM}(t) + E_{DC}(t). \quad (1)$$

从子 MZM 输出的光信号的表达式为

$$E_{s-MZM}(t) = \frac{\alpha E_0 \exp(j\omega_0 t)}{2} \left\{ \exp \left\{ j \frac{\pi}{V_\pi} \left[V_{RF} \cos(\omega_{RF} t) + \frac{V_\pi}{2} \right] \right\} + \exp \left\{ j \frac{\pi}{V_\pi} \left[V_{RF} \cos(\omega_{RF} t + \frac{\pi}{2}) \right] \right\} \right\}. \quad (2)$$

对(2)式进行贝塞尔函数展开,定义调制指数 $m = \frac{V_{RF}}{V_\pi} \pi$ 。当调制指数较小时,二阶及以上高次谐波的幅度较小,可以忽略不计;当调制指数较大时,高次谐波的幅度较大,不可忽略,需要用光滤波器对高次谐波进行抑制。所以在不考虑二阶以上高次谐波的影响时,(2)式简化为

$$E_{s-MZM}(0, t) = \alpha E_0 \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} J_0(m) \exp \left[j \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{4} \right) \right] - J_1(m) \exp [j(\omega_0 t + \omega_{RF} t)] \right\}, \quad (3)$$

式中的第 1 项表示的是光载波分量,第 2 项表示的是光边带分量,可以发现两个分量之间的频率间隔就是 RF 本振的频率,即把毫米波信号搬移到了光波频段。

施加在集成 MZM 的第 3 个臂上的直流偏压为 V_{DC} ，它与附加相位的关系为 $\theta = \frac{V_{DC}}{V_{\pi}} \pi$ 。可以看出参量 θ 由直流偏压 V_{DC} 决定，因此可称之为“直流臂”。从直流臂输出的光载波信号的表达式为

$$E_{DC}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \beta E_0 \exp(j\omega_0 t) \exp(j\theta), \quad (4)$$

式中 β 是直流臂的插入损耗。

所以，从集成 MZM 输出的光单边带信号为

$$E_{MZM}(0, t) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 \left[\alpha J_0(m) \exp\left(j \frac{\pi}{4}\right) + \beta \exp(j\theta) \right] \exp(j\omega_0 t) - \alpha E_0 J_1(m) \exp[j(\omega_0 t + \omega_{RF} t)]. \quad (5)$$

定义参数 $L = \beta/\alpha$ ，则当子 MZM 的插入损耗与直流臂上的插入损耗相同时， $L = 1$ ，称之为平衡损耗；其他情况则为非平衡损耗。根据(5)式，从集成 MZM 输出的单边带信号的光载波和光边带的功率之比 R_{CSR} 为

$$R_{CSR}(\text{dB}) = 20 \lg \left[\frac{\left| J_0(m) \exp\left(j \frac{\pi}{4}\right) + L \exp(j\theta) \right|^2}{\sqrt{2} J_1(m)} \right]. \quad (6)$$

3 载边比分析

在图 1 所示的集成 MZM 中，理想情况下子 MZM 与直流臂的插入损耗为 0 dB，则 $\alpha = 1, \beta = 1$ ，此时参数 $L = 1$ 。根据(6)式，当给定 L 值时，载边比 CSR 由贝塞尔函数的阶数差异 [$J_0(m)$ 和 $J_1(m)$] 以及直流臂上的附加相位 θ 决定。当集成 MZM 处于理想的平衡损耗状态时，CSR 在不同调制指数时随 θ 变化的情况如图 2 所示。 $m = 0.375, 1.0, 1.7$ 分别代表低、中、高调制指数^[18]。从图 2 可以看出，CSR 值的曲线关于 $\theta = 225$ 度对称；各种调制指数下，CSR 都可以取得最佳值 0 dB，此时对应两个最

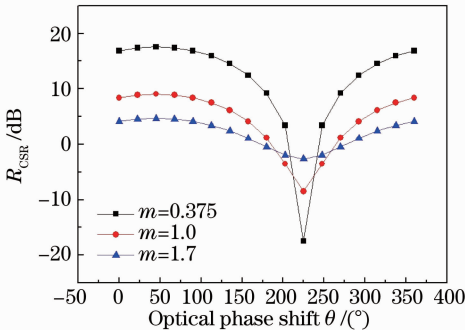


图 2 不同调制指数时 CSR 随 θ 的变化情况

Fig. 2 Variation of carrier-to-sideband ratio with θ for different modulation indexes

佳附加相位 θ 。

一般来讲，经过 RF 信号调制过的光路的损耗要比只经过直流臂光路的损耗大，所以 $L > 1$ ，此时为非平衡损耗。图 3 给出了调制指数为 0.375 时，集成 MZM 的损耗处于不同损耗状态时的载边比变化情况。可以看出，随着 L 值的增大，相同 θ 对应的 R_{CSR} 值也会增大。这是因为根据第一类贝塞尔函数，当 $0 < m < 2$ 时， $0 < J_0(m) < 1$ ，所以 $L > J_0(m)$ 。当 L 值增大时，(4) 式中的项 $J_0(m) \exp\left(j \frac{\pi}{4}\right) + L \exp(j\theta)$ 的模值会单调递增，导致 R_{CSR} 增大。如果 L 值继续增大到 L_{max} ，将会出现最小 R_{CSR} 值为 0 dB 的情况，如图 3 中 L 是 1.2257 的曲线。但是，当增大到 $L > L_{max}$ 时，载边比将不会取到 0 dB，如图 3 中 L 为 1.45 的曲线。此时，需要对直流臂进行适当地衰减，减小集成 MZM 中两条光路之间的损耗差异，才能得到最佳 0 dB R_{CSR} 值。

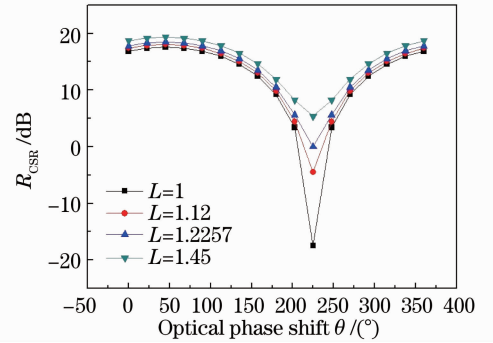


图 3 不同损耗状态时 R_{CSR} 随 θ 的变化情况

Fig. 3 Variation of carrier-to-sideband ratio with θ for different loss states

4 单边带信号性能仿真

4.1 系统仿真模型

通过模拟仿真来分析验证集成 MZM 中不同损耗状态对单边带信号性能的影响，系统的结构如图 4 所示。中心波长为 1553.6 nm (频率 193.1 THz)、线宽为 10 MHz 的连续波激光器(LD)与集成 MZM 相连。数字基带信号的类型选择长度为 $2^7 - 1$ 的不归零编码伪随机码，速率为 2.5 Gb/s。基带信号以差分相移键控(DPSK)方式调制到 40 GHz 的毫米波信号上，然后已调 RF 信号驱动集成 MZM 产生单边带格式的光毫米波信号。单边带信号经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后进入标准单模光纤(SMF)进行传输。单模光纤的衰减系数为 0.2 dB/km，色散系数为 17 ps/(nm · km)。光检测器(PD)对输入的光

毫米波信号进行拍频,输出的电信号经中心频率为 40 GHz 的带通滤波器(BPF)进行滤波获得 RF 信号。携带数据的 RF 信号进入差分解调器进行解

调,解调出的基带信号送至误码测试仪(BERT)进行误码分析。

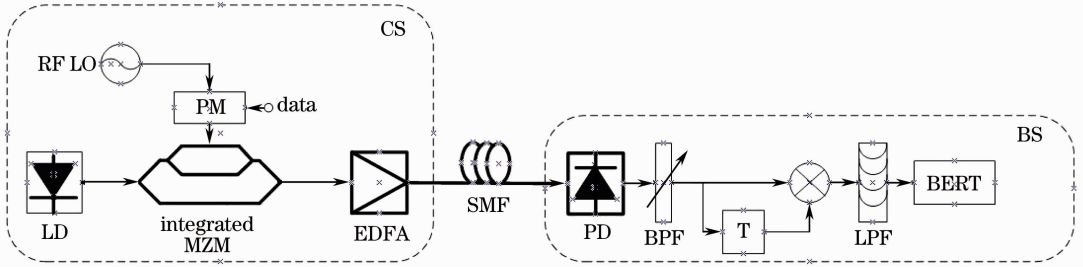


图 4 基于光单边带调制的 RoF 系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of the RoF system based on the OSSB+C modulation

4.2 仿真结果分析

图 5 给出了集成 MZM 处于理想平衡损耗的状态下,调制指数分别为 0.375、1.0 和 1.7 时光毫米波信号载边比的变化情况。可以看出,仿真曲线与理论分析(图 2)的趋势一致;在图中所示的 3 种典型调制指数情况下,光单边带信号均能实现最佳 0 dB 载边比。另外,当调制指数增大时,在相位取值区间 $[0, 360^\circ]$ 内,载边比的起伏程度变小。

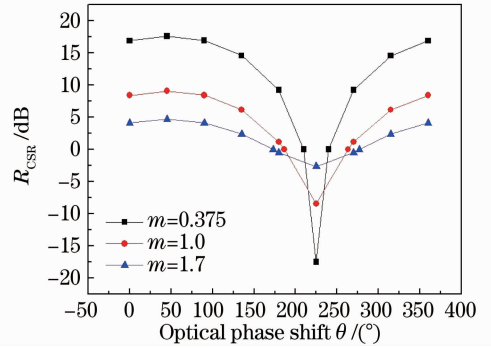


图 5 平衡损耗时不同调制指数时的载边比

Fig. 5 Carrier-to-sideband ratio for the different modulation indices in the balanced loss state

图 6 给出了集成 MZM 处于不同损耗状态时,光单边带信号中光载波分量和一阶边带分量的功率对比关系,其调制指数为 0.375。为了得到最佳的 0 dB 载边比,图 6(a)~6(c)中的附加相位 θ 分别调

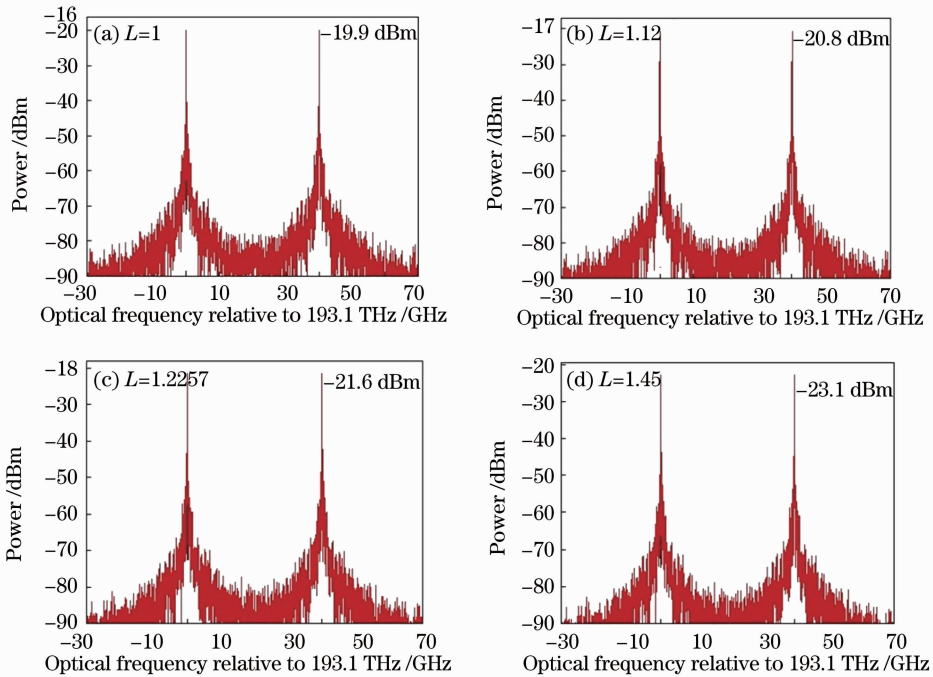


图 6 不同损耗状态时光载波与光边带功率的相对关系

Fig. 6 Comparison of the power of optical carrier and that of the sideband for different loss states

节至最佳值 209.9° 、 213.4° 和 225° 。在图 3 的叙述中已经提到,当 $L=1.45$ 时,需要对通过直流臂的光载波信号进行衰减才能使载边比为 0 dB。在仿真中调节该衰减值为 1.77 dB,此时对应的最佳附加相位 θ 同样为 225° ,从集成 MZM 输出光信号的频谱图如图 6(d)所示。当然,如果直流臂上的衰减不是 1.77 dB, R_{CSR} 取得 0 dB 时对应的最佳附加相位则是 225° 以外的其他值。

从图 6 可以看出,在以上几种典型的损耗状态下,光载波分量和光边带的功率均能够相等,可以得到 0 dB 的最佳载边比;但是,随着 L 值的增大,光信号经过集成 MZM 时衰减也会增大,因此从调制器输出的光单边带信号的功率有所降低。

通过前面的论述可知,附加相位 θ 在 CSR 的取值中起到关键作用。如果 θ 稍微从最佳值处偏移,那么载边比将不会取得 0 dB 的最佳值。对应到图 1 所示的结构中,附加相位 θ 的偏移是由直流偏压 V_{DC} 引起的。定义直流偏压漂移比值为 $\sigma = \frac{\Delta V}{V_{\pi}} \times 100\%$,其中 ΔV 为偏压漂移的量值。根据文献 [12],在单边带 RoF 系统中,当载边比为 0 dB 时,系统的光接收灵敏度将最高。接收灵敏度通常定义为使系统误码率达到某一量级(例如 10^{-9})时所需要的最小接收光功率。该最小接收光功率的值越小则接收灵敏度越高,通信系统的性能也就越好。本文取误码率的量级为 10^{-9} 。

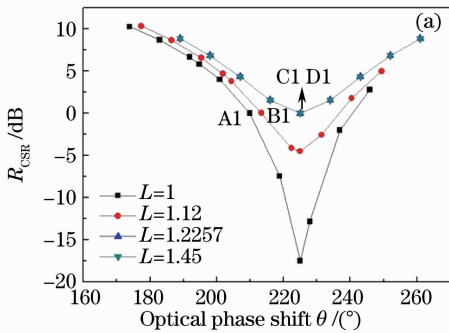


图 7 给出了集成 MZM 处于不同损耗状态时直流偏压漂移比值 σ 对载边比和接收灵敏度的影响,但是为了清楚地区分不同损耗状态时的情况,横坐标设置为附加相位 θ 。图 7(a) 中点 A1、B1、C1 和 D1 对应的载边比均为 0 dB,其对应的横坐标则是最佳附加相位;所有曲线上的点是以最佳附加相位为中心,以 $5\% \times 180^\circ$ 为间隔的(除去 $L=1$ 和 $L=1.12$ 时横坐标为 225° 的情况)。经过对比可以发现,图 7(a) 中的仿真曲线与图 3 中的理论曲线完全一致。

图 7(b) 中点 A2、B2、C2 和 D2 对应的附加相位分别与点 A1、B1、C1 和 D1 的相同,并且曲线上其他点的相位取值与图 6(a) 中的一致。可以看出,在最佳附加相位时,光接收灵敏度最高,这与文献 [12] 的结论是一致的;随着 L 值的增大,也就是集成 MZM 中两路光信号的损耗差增大,输出信号的信噪比降低,导致最佳灵敏度也有所降低。另外,当 $L=1$ 时,以最佳附加相位为中心,接收灵敏度的变化较大,这是由图 7(a) 中对应的 CSR 曲线起伏较大引起的,所以此时需要将直流偏压的偏移控制到 5% 范围内。这样,接收灵敏度的变化将不会超过 1.7 dB。当 $L > 1$ 时,灵敏度的起伏比较平缓。如果将直流偏压控制在 5% 范围内,当 $L=1.12$ 时,灵敏度的变化为 0.23 dB;而当 $L=1.2257$ 和 $L=1.45$ 时,接收灵敏度的变化只有 0.08 dB。所以, RoF 系统具有较好的稳定性。

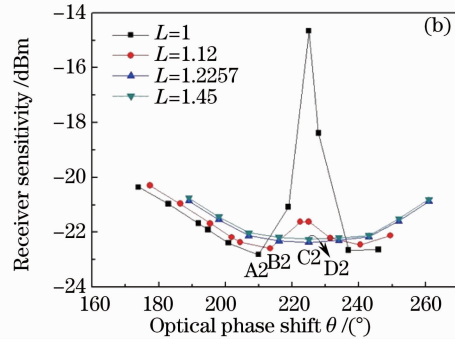


图 7 附加相位 θ 偏移对 CSR(a) 和光接收灵敏度(b) 的影响

Fig. 7 Influence of the deviation of additional phase θ on (a) CSR and (b) receiver sensitivity

图 8 给出了集成 MZM 处于不同损耗状态时光纤长度为 0(背靠背)和 60 km 两种场景下误码率 R_{BE} 与接收光功率的对应关系。可以看出,在相同误码率的情况下,随着集成 MZM 中两个光路的损耗差异的增大,需要的光接收功率也会增大,系统性能有所下降。这与图 7(b) 中接收灵敏度的变化趋势

一致。这种情况并没有随着光纤长度的增加而发生明显改变。通过光纤传输 60 km 后,在误码率为 10^{-9} 的情况下,功率代价大约为 0.3 dB。可以看出,光纤中的色散、非线性等效应并没有对系统误码率性能带来明显影响。

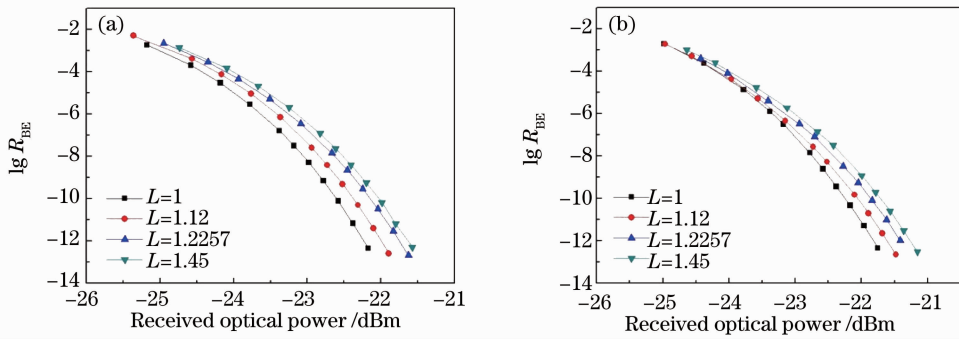


图 8 不同损耗状态时误码率随接收光功率的变化。(a)背靠背,(b)光纤传输距离为 60 km

Fig. 8 Variation of BER with the optical power received for different loss stats. When the transmission distance of fiber (a) 0 and (b) 60 km

5 结 论

本文提出了一种利用集成 MZM 来产生具有最佳载边比的光单边带信号的方法。通过理论分析结合仿真验证的方法指出,当集成 MZM 处于不同损耗状态时,对于任意调制指数,光载波和光边带的功率均能够相等。然后讨论了集成 MZM 中直流偏压偏离最佳值时,在不同损耗状态下 CSR 和接收机灵敏度的变化情况。仿真结果表明,随着集成 MZM 中两路光信号的损耗差增大,由于单边带信号信噪比下降,接收灵敏度有所降低;但是如果将偏压漂移到在 5% 范围内,接收灵敏度的变化程度由平衡损耗状态时的 1.7 dB 逐渐下降到非平衡损耗时的 0.23 dB 和 0.08 dB。所以, RoF 系统具有较好的稳定性。

参 考 文 献

- 1 A. J. Seeds, K. J. Williams. Microwave photonics[J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2006, **24**(12): 4628~4641
- 2 J. Yao. Microwave photonics[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3): 314~335
- 3 G. Pillet, L. Morvan, M. Brunel *et al.*. Dual-frequency laser at 1.5 μm for optical distribution and generation of high-purity microwave signals[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(15): 2764~2773
- 4 Jiang Tao, Huang Dexiu, Zhang Xinliang *et al.*. A full-duplex 60 GHz-band radio over fiber system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 37~42
江涛, 黄德修, 张新亮等. 全双工 60 GHz 的光纤无线通信系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 37~42
- 5 Zhu Chuanhu, Lu Jia, Dong Ze *et al.*. Radio-over-fiber system with frequency quadruple optical millimeter-wave generation utilizing cascaded phase modulator along with an intensity modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 321~325
朱传湖, 卢嘉, 董泽等. 采用级联相位调制器和强度调制器产生四倍频光载毫米波的光纤无线通信系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 321~325
- 6 H. Chi, J. Yao. Power distribution of phase-modulated microwave signals in a dispersive fiber-optic link[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(4): 315~317

- 7 J. Ma, J. Yu, C. Yu *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): 3244~3255
- 8 S. Shimotsu, S. Oikawa, T. Saitou *et al.*. Single side-band modulation performance of a LiNbO₃ integrated modulator consisting of four-phase modulator waveguides [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(4): 364~366
- 9 J. Yu, M. Huang, Z. Jia *et al.*. A novel scheme to generate single-sideband millimeter-wave signals by using low-frequency local oscillator signal[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(7): 478~480
- 10 Zhao Jiangong, Liu Zengji, Liu Xiangling *et al.*. Optimum modulation index for single sideband radio over fiber system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1960~1964
赵建功, 刘增基, 刘香玲等. 单边带 RoF 系统的最佳射频调制指数[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 1960~1964
- 11 J. Zhao, Z. Liu, X. Liu *et al.*. Generation of radio signals using a novel Mach-Zehnder modulator with four arms [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(22): 4353~4357
- 12 C. Lim, C. Lin, M. Attygalle *et al.*. Analysis of optical carrier-to-sideband ratio for improving transmission performance in fiber-radio Links[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2006, **54**(5): 2181~2187
- 13 J. Li, T. Ning, L. Pei *et al.*. An improved radio over fiber system with high sensitivity and reduced power degradation by employing a triangular CFBG[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(7): 516~518
- 14 M. Attygalle, C. Lim, G. J. Pendock *et al.*. Transmission improvement in fiber wireless links using fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 190~192
- 15 P. C. Peng, C. T. Lin, W. J. Jiang *et al.*. Improvement of transmission in fibre wireless system using semiconductor laser amplifier[J]. *IET Electron. Lett.*, 2008, **44**(4): 520~521
- 16 S. T. Goldstein, D. Dolfi, J. P. Huignard *et al.*. Stimulated Brillouin scattering for microwave signal modulation depth increase in optical links[J]. *IET Electron. Lett.*, 2000, **36**(11): 944~946
- 17 J. Zhao, Z. Liu, X. Liu *et al.*. Optimisation of carrier-to-sideband ratio by triple-arm Mach-Zehnder modulators in radio-over-fibre links[J]. *IET Optoelectronics*, 2010, **4**(5): 183~188
- 18 C. Wu, X. Zhang. Impact of nonlinear distortion in radio over fiber systems with single-sideband and tandem single-sideband subcarrier modulations [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(5): 2076~2090