# 光自差法生成微波/毫米波技术中偏振失谐研究*

高嵩 裴丽† 宁提纲 祁春慧 刘观辉 李晶

(全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京交通大学, 北京 100044)

(2011 年 9 月 2 日收到; 2011 年 10 月 21 日收到修改稿)

对光外差法生成微波/毫米波技术中的偏振失谐进行了分析. 首次推导出偏振失谐对微波/毫米波功率影响的计算公式. 利用自行制作的基于双波长保偏光纤光栅激光器的微波/毫米波发生器生成 30 GHz 左右的微波/毫米波信号, 其偏振失谐的实验结果与理论分析结果一致, 证明了理论分析的正确性. 最后, 应用分析结果模拟仿真了偏振失谐对 60 GHz 毫米波信号的影响, 得出了不同情况下系统的误码率及不同传输距离下的眼图. 结果表明, 在光纤无线传输链路中采用偏振失谐控制技术会大大提高链路的可靠性, 在对链路进行偏振失谐控制的前提下, 传输 30 km 仍可保持误码率 $10^{-9}$ 以及很好的眼图, 说明了偏振失谐控制的重要性.

**关键词**: 偏振失谐, 微波/毫米波, 光自差法

**PACS:** 42.25.Ja, 42.30.Lr, 42.79.Dj

## 1 引 言

随着人们对移动/无线通信所提供的质量及服务要求的不断提高, 一种光和微波结合的通信技术 —— 光纤无线通信技术应运而生. 其应用光纤链路传输微波/毫米波信号, 结合了光纤通信与无线通信的优点, 在宽带接入、通信等领域有着广泛的应用 [1−3]. 利用光域方法生成、传输微波/毫米波信号成为其中最为关键的技术之一.

目前, 微波/毫米波信号生成方法可以分为三个领域: 强度调制 - 直接解调法 [4,5]、频率上转换法 [6] 和光自差法 [7]. 其中光自差法是目前公认最可靠的微波/毫米波生成方法, 其利用两束不同频率的光波在光电探测器上差频生成微波/毫米波. 但是由于偏振模色散 (polarization mode dispersion, PMD) 的存在, 两束差频光波在光纤链路中传播时其偏振态会发生演化, 在光电探测器上差频时, 由于偏振矢量方向不一致产生的偏振失谐会对微波/毫米波信号的功率产生不可忽视的影响 [8,9]. 即使采用保偏光纤进行传输, 由于光纤制作过程中产生的随机非圆性, 使得光纤两个偏振主轴的传输常数也会随传输距离、温度等因素发生随机变化 [10].

本文充分考虑双折射光纤中光波偏振态演化的随机特性, 推导出偏振失谐在光自差法中对生成微波/毫米波技术功率的影响的计算公式. 使用基于双波长保偏光纤光栅激光器的微波/毫米波发生器生成 30 GHz 左右的微波/毫米波信号, 对理论分析结果进行了实验验证. 实验结果与理论分析结果一致, 证实了理论分析的正确性. 最后, 在应用光自差法的数字光纤无线传输链路中, 应用理论分析结果模拟计算了偏振失谐对 60 GHz 微波/毫米波信号的影响, 并分析了各项参数的影响, 分析结果对实现高质量通信具有重要的意义.

## 2 理论分析

图 1 为典型的光外自差法生成微波/毫米波系统示意图. 其中 $L_1$, $L_2$ 为激光器; MZM 为马赫 - 曾德尔调制器; PD 为光电探测器.

$L_1$ 与 $L_2$ 的出射光分别为 $W_1$ 和 $W_2$, $W_2$ 通

* 国家自然科学基金 (批准号: 60837002, 61177069), 留学回国人员基金 (批准号: 教外司留 [2008]890 号) 和教育部博士点基金 (批准号: 20080040002) 资助的课题.

† E-mail: lipei@bjtu.edu.cn

© 2012 中国物理学会 Chinese Physical Society 

过 MZM 被副载波调制后, 两者耦合进入传输光纤, 最后差频产生微波/毫米波. 一般来讲, 需要将 $W_1$ 和 $W_2$ 的分解为两个主轴下的线偏振矢量, 在传输结束后再进行叠加. 由于制作工艺、温度等外界因素的影响, 光纤两个偏振主轴的传输常数不同, 叠加后的偏振矢量方向一般是不确定的. 由于两个偏振矢量之间存在夹角, 差频时就会产生偏振失谐, 导致功率损耗.

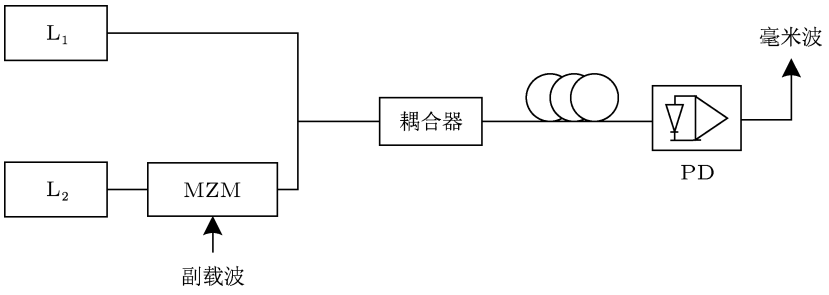


图 1 光自差法生成微波/毫米波系统示意图

设 $W_1$ 与 $W_2$ 的中心频率分别为 $f_1$ 和 $f_2$, 振幅都为 $A$, 其初始偏振矢量与 $x$ 主轴之间的夹角分别为 $\alpha$, $\beta$. 则输入光场可表示为

$$E_{\rm in} = A\exp(\mathrm{j}2\pi f_1 t)\begin{pmatrix}\cos\alpha\\ \sin\alpha\end{pmatrix} + A\exp(\mathrm{j}2\pi f_2 t)\begin{pmatrix}\cos\beta\\ \sin\beta\end{pmatrix}. \tag{1}$$

如传输光纤为保偏光纤, 其传输矩阵可以表示为 [9,11]

$$T_i = \begin{pmatrix}\exp(-\mathrm{j}\delta_i^x) & 0\\ 0 & \exp(-\mathrm{j}\delta_i^y)\end{pmatrix}, \tag{2}$$

其中 $\delta_i^{x,y} = (2\pi/\lambda_i)\cdot n_{x,y}\cdot z$; $n_x$, $n_y$ 分别为 $x$, $y$ 主轴折射率; $\lambda_i$ 为不同频率分量的波长, $z$ 为传输距离. 忽略光纤损耗、色散以及非线性效应, 输出光场可以表示为

$$\begin{aligned}E_{\rm out} =& T_i(E_1+E_2)\\ =& A\exp(\mathrm{j}2\pi f_1 t)\left[\begin{pmatrix}\cos\alpha\exp(-\mathrm{j}\delta_1^x)\\ \sin\alpha\exp(-\mathrm{j}\delta_1^y)\end{pmatrix}\right]\\ &+ A\exp(\mathrm{j}2\pi f_2 t)\left[\begin{pmatrix}\cos\beta\exp(-\mathrm{j}\delta_2^x)\\ \sin\beta\exp(-\mathrm{j}\delta_2^y)\end{pmatrix}\right],\end{aligned} \tag{3}$$

根据光电探测器的平方律特性, 其输出电流为

$$i_{\rm out} = \int_{-\infty}^{+\infty} |E_{\rm out}|^2 \mathrm{d}t. \tag{4}$$

由于 $n_x$, $n_{,y}$ 的随机性, $i_{\rm out}$ 为一个随机信号, 其值的变动服从统计规律. 为了进行计算, 必需要获得与 $n_x$, $n_{,y}$ 相关变量的统计规律.

差分群时延 (differential group-delay time, DGD) 是用来衡量 PMD 大小的物理量, 其值可以通过式 $\tau = (n_x - n_y)/c$ 计算, $c$ 为真空中光速. DGD 值 $\tau$ 符合麦克斯韦分布, 其概率分布函数为 [12,13]

$$f_z(\tau) = \frac{32\tau^2}{\pi^2\xi_z^3 z}\exp\left[-\frac{4}{\pi z}\left(\frac{\tau}{\xi_z}\right)^2\right], \tag{5}$$

其中 $\xi_z$ 为 PMD 均值, 是一个不随外界条件变化而改变的参量, 如果光纤确定, 它的 PMD 均值也就被确定 [14]. 将 (5) 式代入 (4) 式, 根据 $\tau$ 的统计特性和随机信号分析原理计算, 得到输出电流为

$$\begin{aligned}i_{\rm out} &= A^2\int_{-\infty}^{+\infty}\left\{\begin{array}{l}\cos(\alpha-\beta)\cos\left[\omega_{\rm RF}t + \dfrac{z\omega_{\rm RF}(n_x+n_y)}{2c}\right]\cos\left(\dfrac{z\omega_{\rm RF}\xi}{2}\right)\mathrm{d}\xi\\ -\cos(\alpha+\beta)\sin\left[\omega_{\rm RF}t + \dfrac{z\omega_{\rm RF}(n_x+n_y)}{2c}\right]\sin\left(\dfrac{z\omega_{\rm RF}\xi}{2}\right)\mathrm{d}\xi\end{array}\right\}\\ &= A^2\cos\eta\left(1-\frac{\pi^3\xi_z^2 f_{\rm RF}^2 z}{8}\right)\exp\left(-\frac{\pi^3\xi_z^2 f_{\rm RF}^2 z}{16}\right)\times\cos(4\pi f_{\rm RF}t),\end{aligned} \tag{6}$$

其中, $\eta = |\alpha - \beta + 2\pi \cdot f_{\mathrm{RF}} \cdot (n_x + n_y) \cdot z/c|$ 为两束光波输出偏振矢量的夹角, 也就是引起偏振失谐的失谐角. 失谐角对信号功率的影响非常大, 当两个差频光波的偏振矢量正交时, 通过差频已经得不到微波/毫米波信号. 所以, 控制偏振失谐在光纤无线传输链路中十分重要.

## 3 实验验证

为了证实理论分析的正确性, 我们搭建了基于双波长保偏光纤光栅激光器 [12] 的微波/毫米波发生器, 如图 2 所示.

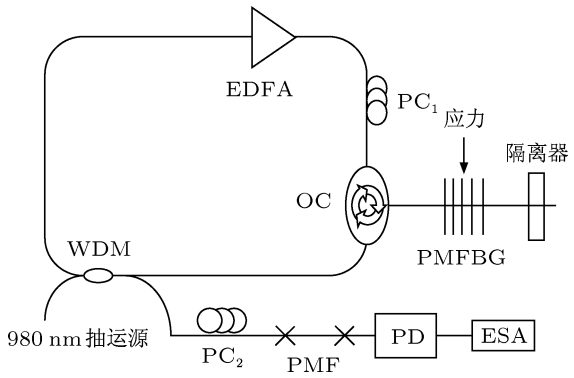


图 2 微波/毫米波发生器结构示意图

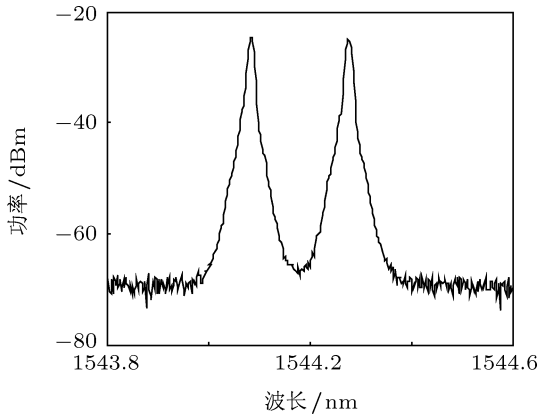


图 3 保偏光纤光栅反射谱

保偏光纤光栅 (PMFBG) 的反射谱为两个偏振方向相互正交的线偏振光, 见图 3. 采用此激光器既保证了双波长输出, 满足差频需求; 又可以通过偏振控制器 2($PC_2$) 调节输出偏振矢量的振动方向, 分析偏振失谐的影响. 偏振控制器 1($PC_1$) 的作用为调整环形腔内的双折射, 控制两个反射光的功率比, 实现功率相等双波长激光输出 [15]. 激光器中所使用 PMFBG 与传输使用的保偏光纤 (PMF) 均使用自制熊猫型保偏光纤制作而成. PMFBG 的反射谱和光电探测器 (PD) 差频生成的微波/毫米波信号频谱分别通过 ANDO AQ6317 光谱仪和 n9010a Agilent x-series 电频谱仪 (ESA) 观测. 图 2 中其他器件为: 掺饵光纤放大器 (EDFA), 光环行器 (OC), 波分复用耦合器 (WDM).

在 (6) 式中, PMD 均值 $\xi_z$ 可以使用固定分析仪测量法进行测量 [14], 微波/毫米波的频率 $f_{\mathrm{RF}}$ 由保偏光纤光栅两个反射中心波长差确定, 传输距离 $z$ 就是选用光纤的长度. 使用光功率计测得激光器出射功率为 $A^2 = 5.5$ dBm. 由于调节 $PC_2$ 控制两个入射光波的偏振方向是随机的, 所以失谐角 $\eta$ 的值不能通过实验确定.

为了探究 $\eta$ 对功率的影响, 我们采用的方法如下: 首先随机调节 $PC_2$, 使得入射偏振光以随机角度入射, 即失谐角 $\eta$ 的大小为随机值. 随后, 我们固定 $PC_2$, 这样 $\eta$ 值也随之被固定.

经过长度为 15 km 长保偏光纤传输 (PMD 均值约为 0.48 ps/$\sqrt{\mathrm{km}}$) 后, 生成微波/毫米波频谱如图 4(a) 所示, 其功率 $p$ 与频率分别为 −70.49 dBm 和 20.788 GHz. 将以上参量代入 (6) 式, 计算得 $\eta = 1.1808$. 将保偏光纤截断, 分别取 10 km, 7.5 km 和 5 km, 考虑光纤损耗等因素, 代入 $\eta = 1.1808$ 计算得出生成微波/毫米波功率为 −66.13 dBm, −63.94 dBm 和 −61.76 dBm. 实验测量频谱如图 4(b)—(d) 所示, 其测试功率分别为 −66.44 dBm, −64.26 dBm 和 −62.5 dBm, 实验结果与计算结果基本一致, 误差在容许的范围内.

为了进一步验证理论分析的正确性, 在 PMFBG 上施加不同应力, 使得两个反射中心波长发生漂移, 生成微波/毫米波的频率也随之发生变化 [16]. 我们对比了不同频率下理论与实验测得的功率值, 如图 5 所示.

从图 5 可以看出, 理论值与实验测得值基本相符, 由此, 可以证明利用推导出的 (6) 式能够准确计算偏振失谐对微波/毫米波功率的影响. 此分析的结果可以为实际光纤无线链路中偏振失谐控制方案提供较准确的理论依据.

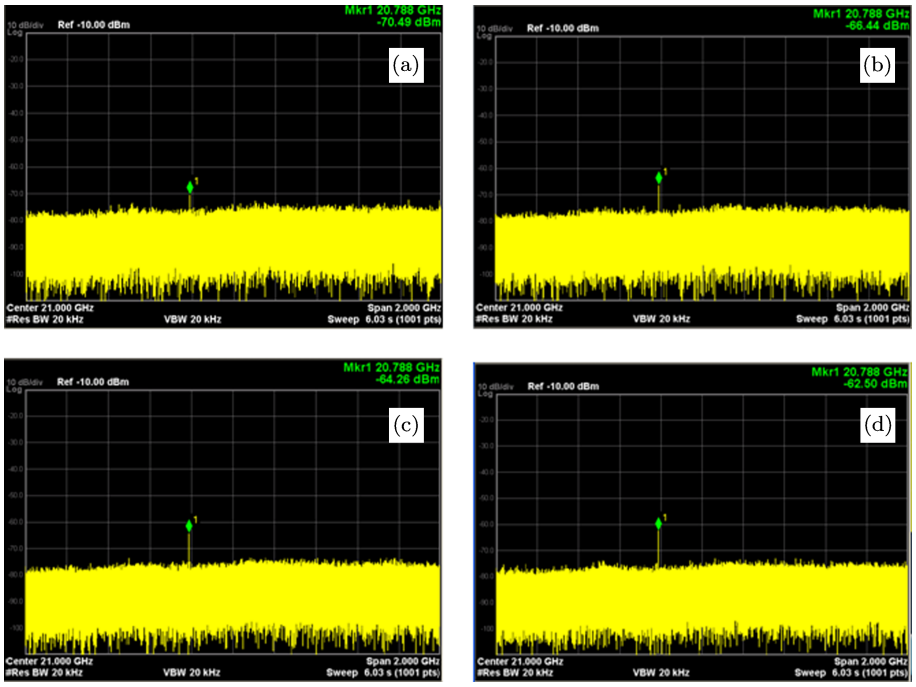


图 4 微波/毫米波频谱 (a) $p=-70.49$ dBm; (b) $p=-66.44$ dBm; (c) $p=-64.26$ dBm; (d) $p=-62.5$ dBm

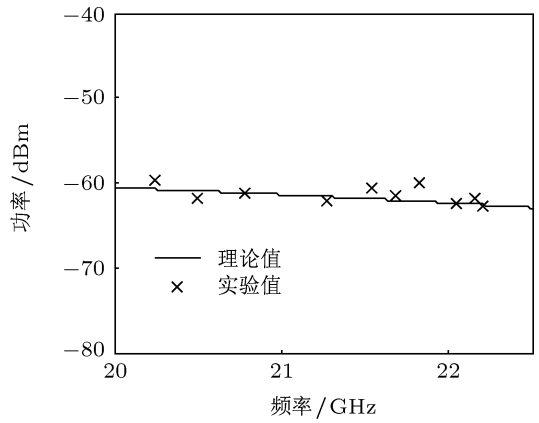


图 5 微波/毫米波功率随频率变化图

## 4 60 GHz 毫米波偏振失谐分析

为了探究实际光纤无线链路中的偏振失谐的影响和进行偏振失谐控制的重要性, 我们利用分析结果结合 MATLAB 软件对 60 GHz 光纤无线链路进行模拟仿真.

在模拟仿真中, 我们仍采用图 1 所示结构生成 60 GHz 毫米波. 速率为 2.5 GHz 伪随机序列作为基带信号通过相位调制器调制到射频信号 (频率为 $f_{\mathrm{RF}}$) 上实现相移键控 (phase shift keying, PSK) 调制, 得到副载波信号. 然后再将副载波信号通过 MZM 调制到光波上得到光载波信号. 在 PSK 调制中, 系统误码率 (bit error rate, BER) 计算公式为

$$P_{\mathrm{e}}=\frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\sqrt{\frac{A^4\cos^2\eta(1-\frac{\pi^3\xi_z^2 f_{\mathrm{RF}}^2 z}{8})^2\exp\left(-\frac{\pi^3\xi_z^2 f_{\mathrm{RF}}^2 z}{8}\right)}{n_0 B}}\right), \tag{7}$$

式中, 根号下为系统输出信噪比, $n_o$ 为高斯白噪声功率谱密度, $B$ 是滤波器的带宽. 在仿真中, 激光器的输出功率 $A^2=20$ mW, 高斯白噪声功率谱密度 $n_0=10^{-19}$ w/Hz, 滤波器带宽 $B=10$ GHz. 我们分别从失谐角 $\eta$、传输距离 $z$ 以及 PMD 均值 $\xi_z$ 三个参数分析偏振失谐对 60 GHz 毫米波的影响. 图 6 给出不同参量下 60 GHz 光纤无线传输链路的误码率大小.

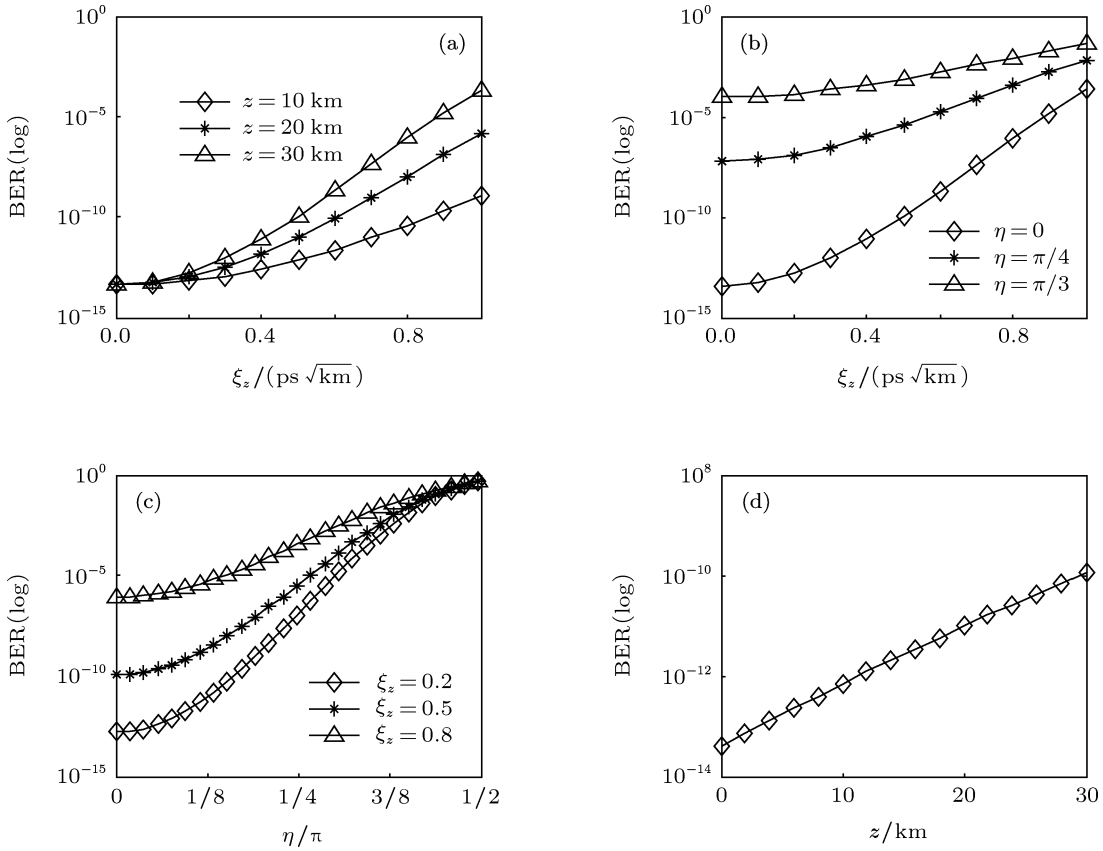


图 6 60 GHz 光纤无线传输链路的 BER (a) 不同传输距离下 BER 与 $\xi_z$ 的关系, $\eta=\pi/4$; (b) 不同失谐角下 BER 与 $\xi_z$ 的关系, $z=30$ km; (c) 不同失谐角下 BER 与 $\eta$ 的关系; (d) BER 与 $z$ 的关系, $\eta=0$

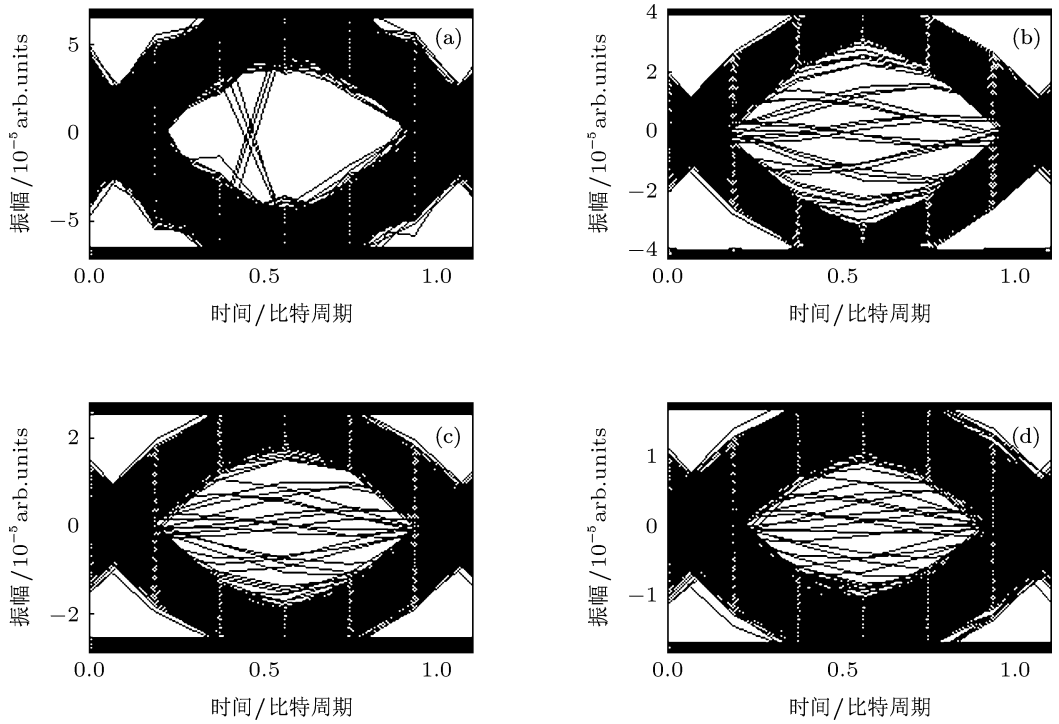


图 7 60 GHz 数字系统接收端眼图

对比四图可以看出, 失谐角 $\eta$ 与 PMD 均值 $\xi_z$ 对系统性能影响较大. 从图 6(a), (b) 两图可以观察到, 由 $\xi_z$ 引起的误码率落差在 5 个数量级左右, 由 $\eta$ 引起的落差更可达到 10 几个数量级, 如图 6(c) 所示. 图 6(d) 中, 在 $\eta = 0$ 的前提下, 即使传输距离为 30 km 误码率也在 $10^{-9}$ 以下. 因此, 为了提高系统可靠性, 减小 $\eta$ 对系统的影响, 采用同一激光器并对其出射光进行偏振控制是必不可少的. 另外, 如果采用普通光纤传输, 差频时必然会因失谐角的存在对系统性能造成影响, 图 6(c) 中可以得出, 当光纤的 PMD 均值在 0.5 ps/$\sqrt{\text{km}}$ 左右时, 失谐角在 45° 之内仍可保证链路的可靠性. 在某些精密通信情况下, 使用 PMF 传输可以大大提高通信的质量.

另外, 为了探究随机噪声对链路性能的影响, 在失谐角为 0(使用 PMF 传输)、PMD 均值在 0.5ps/$\sqrt{\text{km}}$ 且对传输光纤采用色散补偿技术的条件下, 测试系统的眼图如图 7 所示.

图 7(a)—(d) 所示分别为背靠背, 10 km, 20 km 和 30 km 传输后的眼图. 对比四图可以发现, 在失谐角为零的情况下, 传输距离对眼图的影响不大, 即使在传输 30 km 后, 眼图仍没有闭合的迹象, 眼图内杂乱线条为色度色散引起的噪声, 并不能完全消除. 图 7 说明如控制失谐角大小, 可以将偏振失谐对链路性能的影响降到最低, 并且可以提高链路的容错性. 即使系统内存在随机噪声, 也可以在长距离传输时保持较好的眼图.

## 5 结 论

首次推导出光自差法中偏振失谐对微波/毫米波功率影响的计算公式, 在实验室条件下, 应用自行制作的发生器进行实验, 验证了理论分析的正确性. 应用理论分析的结果对 60 GHz 光纤无线链路进行模拟仿真, 并分析了各参量对 60 Ghz 微波/毫米波的影响, 为实际应用中偏振失谐控制方案提供了准确的理论依据.


[1] COOPER J A 1990 *Electron. Lett.* **26** 2054

[2] Xin X J, Zhang L J, Liu B, Yu J J 2010 *Opt. Expr.* **19** 7847

[3] Liu B, Xin X J, Zhang L J, Yu J J, Zhang Q, Yu C X 2010 *Opt. Expr.* **18** 2137

[4] Gliese U, Norskov S, Nielsen T N 2008 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **44** 1716

[5] Sotobayashi H, Kitayama K 1999 *J. Lightw. Technol.* **17** 2488

[6] Ogawa H, Polifko D, Banba S 1992 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **40** 2285

[7] Li J, Ning T, Pei L, Qi C 2009 *Opt. Lett.* **24** 3136

[8] Hofstetter R, Schmuck H, Heidemann R 1995 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **43** 2263

[9] Schmuck H 1994 *Electron. Lett.* **30** 1503

[10] Karlsson M 2001 *J. Lightw. Technol.* **19** 324

[11] Curti F, Daino B, Marchis D G, Matera F 1990 *J. Lightw. Technol.* **8** 1162

[12] Adamczyk H O, Sahin B A, Yu Q, Lee S Willner E A 2001 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **49** 1962

[13] Galtarossa A, Someda G C, Matera F, Schiano M 1994 *Fiber Integra. Opt.* **13** 215

[14] Poole D C, Favin L D 1994 *J. Lightw. Technol.* **12** 917

[15] Feng S, Xu O, Lu S, Ning T, Jian S 2009 *Opt. Communicati.* **282** 2165

[16] Sun L, Feng X, Zhang W, Xiong, Liu Y, Kai G, Yuan S, Dong X 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1453

# Study on the polarization mismatch in micro/millimeter-wave generation employing optical self-heterodyning technology*

Gao Song Pei Li† Ning Ti-Gang Qi Chun-Hui Liu Guan-Hui Li Jing

( *Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Beijing Jiaotong University, Beijing* 100044, *China* )

( Received 2 September 2011; revised manuscript received 21 October 2011 )

**Abstract**

In this paper, we study the effect of polarization mismatch (POM) in micro/millimeter-wave (mm-wave) generation employing optical self-heterodyning technology. The calculation formula of POM-induced mm-wave power penalty is derived for the first time. Utilizing a mm-wave generator based on a homemade dual-wavelength polarization maintaining fiber grating laser, several mm-wave with frequency around 30 GHz is generated. The experimental results accord well with the theoretical ones, which can prove that the theoretical analysis is correct. Finally the simulation of effect of POM on 60 GHz is performed. Under different conditions, the bit error rates (BERs) and the eye diagrams are obtained. BER below $10^{-9}$ and clear eye diagrams can be obtained if the POM is under control. So it is very important to control the POM in fiber-optic wireless link.

**Keywords:** polarization mismatch, micro/millimeter-wave, optical self-heterodyning

**PACS:** 42.25.Ja, 42.30.Lr, 42.79.Dj

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60837002, 61177079), the Foundation for the Returning Scholars (Grant No. [2008] 890), and the Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (Grant No. 200800040002).

† E-mail: lipei@bjtu.edu.cn