

文章编号: 0258-7025(2010)06-1579-06

基于双级单边带调制产生光纤载太赫兹信号的新方案

侯春宁 刘霄 郑曦 邵宇丰* 黄德修 迟楠

(复旦大学通信科学与工程系专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 200433)

摘要 提出并研究了一种应用于光纤载太赫兹波通信系统(ToF)中双级级联单边带(DSSB)调制的新方案。首先抑制载波双边带(DSB)调制产生太赫兹波;然后选择载波抑制 DSB 中的一个边带进行一级单边带(SSB)数据调制,在数据调制过程中再次采用基带 SSB 调制技术,由此产生 DSSB 调制。分析结果显示,对 0.1 THz 中频载波,数据速率为 5 Gb/s 的光载太赫兹信号进行 100 km 光纤传输,无色散补偿的误码率仅为 1×10^{-11} 数量级,接收机灵敏度为 -26.6 dBm。给出了单、双边带调制信号频率选择性衰落对比曲线图,有效地证明了 DSB 信号传输中色散衰落现象的存在以及 SSB 调制对于这种衰落现象的有效抑制,这些结论均证明新方案明显优于传统方案。

关键词 光通信;载波抑制;双级单边带调制;光纤载太赫兹波

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1579

A Novel Scheme to Generate Terahertz Signal over Fiber Based on Dual-Stage Single Side Band Modulation

Hou Chuning Liu Xiao Zheng Xi Shao Yufeng Huang Dexiu Chi Nan

(State Key Laboratory of A Special Integrated Circuit and System, Department of communications Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract A dual-stage optical single side band (DSSB) modulation scheme to combat chromatic dispersion for the terahertz over fiber (ToF) systems application is proposed. In the scheme, terahertz wave is obtained via carrier-suppression double sideband (DSB) modulation, one sideband of terahertz wave then undergo the first single sideband (SSB) modulation and the second baseband SSB modulation in the process of data modulation, which achieves cascade SSB modulation. As can be seen from the simulation result, for mid-frequency carrier of 0.1 THz, the bit error rate (BER) performance without dispersion compensation achieves 1×10^{-11} and the sensitivity of the receiver is -26.6 dBm with a data rate of 5 Gb/s after 100 km transmission. Through comparing the power penalty of DSB and DSSB, we demonstrated the optical SSB modulation has better dispersion tolerance. This paper also shows the contrastive curves of frequency selective fading for the SSB and DSB modulated signals, which definitely demonstrates the existence of dispersion fading during the DSB transmission as well as the effective suppression of the fading implemented by the SSB modulation. The novel scheme's preference is exceeded than the conventional scheme's, which is demonstrated by these theory and simulation.

Key words optical communications; carrier suppression; dual-stage single side band modulation; terahertz over fiber

1 引言

随着人们对高速率通信网络传输带宽的需求日益增加,通信系统向更高频段延伸的要求日益迫

切^[1~8]。目前宽带无线通信的个域网标准已经规定了 60 GHz 频段,频段进一步提高就进入了太赫兹波段(THz 波,频率在 0.1~10 THz 范围)。因此,

收稿日期: 2009-09-08; 收到修改稿日期: 2009-10-15

基金项目: 国家 973 计划(2010CB328300)、国家自然科学基金(60837004, 60777010)、国家 863 计划(2009AA01Z253, 2007AA01Z260)和曙光学者基金资助课题。

作者简介: 侯春宁(1979—),女,硕士研究生,主要从事光纤无线通信(RoF)方面的研究。E-mail: 082021018@fudan.edu.cn

导师简介: 迟楠(1974—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤通信系统及关键光器件等方面的研究。

E-mail: nanchi@fudan.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: shaoyufeng@fudan.edu.cn

研究太赫兹波通信可以拓展下一代宽带无线移动通信的频谱,对于抢占频谱、有效利用资源将具有非常大的战略意义^[1~6]。太赫兹波通信具有带宽宽、定向性好、天线小和安全性好等特点^[9],但是太赫兹波通信面临的最严重问题是该频段在大气传输中衰减严重,因此研究光纤载太赫兹通信(ToF)技术具有重要的实用意义。

ToF 技术是把太赫兹信号作为中频调制到光波上然后在光纤中进行长距离传输,ToF 技术具有高频率、高可靠性、超高带宽、低损耗和抗干扰能力强等优点^[9]。虽然 ToF 技术备受瞩目,但在传输高频信号时会面临光纤信道色度色散问题,不仅会产生频率衰落效应,而且会造成信息码元的时延啁啾,严重影响信号传输质量。其中衰落效应导致传输的信号产生余弦波动式衰落,这意味着在某些衰落节点信号会消失,造成误码率(BER)增高,从而直接降低通信性能。据报道^[10~14],有一些方案能克服色散衰落效应,例如添加色散补偿光纤、利用啁啾布拉格光栅、多节分布布拉格反射(DBR)半导体激光器等幅外差后均衡法处理信号等,但这些方法并没有从根本上解决色散衰落效应带来的影响。

本文提出采用双级级联单边带(DSSB)方案来抵抗 0.1 THz ToF 系统中信号传输的色散致频率衰落影响。在方案原理部分对于太赫兹波和 DSSB 调制信号的产生,给出了详细的推导过程。通过 ToF 系统中的 DSSB 和双边带(DSB)两套方案的频衰特性对比,清楚地看到 DSB 调制方式在远距离传输中受色散影响,产生的衰落现象以及单边带(SSB)调制方式对于色散影响的良好容忍度。由于采用 DSSB 调制,光电检测后的电信号频谱窄,因此可以有效利用带宽资源,并可以降低 THz 频段带通滤波器的要求,有利于光纤载太赫兹系统的实用化。本文研究了 ToF 系统中的 DSSB 和 DSB 两种调制方案的传输特性,给出了传输特性曲线图和眼图,其中 DSSB 调制信号传输 100 km 后解调仍有较低的误码率和良好的信号区分度,接收机灵敏度仅有 -26.6 dBm,证明了 DSSB 方案的有效性。

2 原 理

在针对高频系统的色散衰落效应提出 DSSB 调制方案中,主要的技术特点是:1)目前很难获得用于科学研究达到 THz 频率的实验仪器,因此采用光载波抑制(OCS)的调制方式产生副载波,并在此基础上拍频产生毫米波;2)为了抵抗色散并且用于拍频将基于 OCS 技术产生的副载波上下频带滤出,上边带加载信息,下边带用于拍频;3)为了提高信号传输质量,在基于 OCS 技术产生的副载波上边带上加载信息,并在此基础上进行 SSB 调制。

2.1 THz 波产生

THz 波直接产生具有很大的困难,因为国内无法获得高频的信号发生器,即便是实验室的科研用途,目前也没有 100 Gb/s 的信号源,因此要结合副载波调制方式产生 THz 波。图 1 所示为双臂平衡马赫曾德尔调制器(MZM)生成 OCS 波,DFB 是分布反馈激光器, V 为 MZM 上下臂的直流偏置电压。

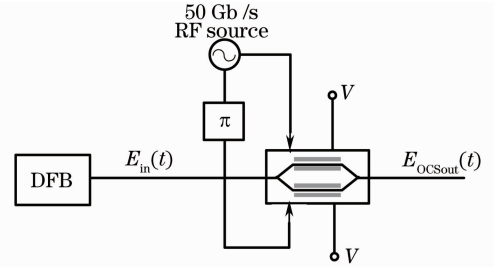


图 1 双臂平衡 MZM 生成 OCS 波

Fig. 1 OCS wave generated by dual-beam balanced MZM

图 1 中 $E_{in}(t)$, $E_{OCSout}(t)$ 分别为输入、输出信号,不难得出

$$E_{OCSout}(t) = E_{in}(t)h(t), \quad (1)$$

式中 $h(t)$ 为系统冲击响应函数,可表示为

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \times$$

$$\frac{Y_{\text{split-upper}} \exp(j\phi_{\text{upper}}) + Y_{\text{split-lower}} \exp(\pm j\phi_{\text{lower}})}{A}, \quad (2)$$

双臂平衡 MZM 中, $Y_{\text{split-upper}} = a = \sqrt{0.5 + \epsilon} = \sqrt{0.5}$,

$Y_{\text{split-lower}} = \sqrt{1 - a^2} = \sqrt{0.5}$, 调制器衰减 $A = 1$ 。

OCS 产生的毫米波

$$E_{OCSout}(t) = E_0 \cos \left\{ \pi \left[\frac{V_m}{V_\pi} \cos(\omega_{RF} t) + \frac{V_{dc}}{V_\pi} \right] \right\} \cdot \cos(\omega_c t) =$$

$$E_0 \{ \cos p \cdot \cos [m \cos(\omega_{RF} t)] - \sin p \cdot \sin [m \cos(\omega_{RF} t)] \} \cdot \cos(\omega_c t), \quad (3)$$

式中 ω_c 为 DFB 的频率, V_{dc} 为图 1 中的 V , $V_{dc} = V_m = V_\pi/2$, 则(3)式用贝塞尔函数表示为

$$E_{\text{OCSout}}(t) = E_0 \cdot \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \{ J_{2n-1}(m) \cos[\omega_c t + (2n-1)\omega_{\text{RF}} t - n\pi] + J_{2n-1}(m) \cos[\omega_c t - (2n-1)\omega_{\text{RF}} t + n\pi] \} \right\}, \quad (4)$$

从(4)式中可以清楚地看到,输出信号的频谱特性为只有奇数边带,零界边带被完全抑制。

2.2 SSB 调制

图 2 所示为光 SSB 调制信号产生的原理图。通过对信号经过有限冲击响应希尔伯特变换,利用一个双臂平衡 MZM 和一个相位调制器产生 SSB 信号。

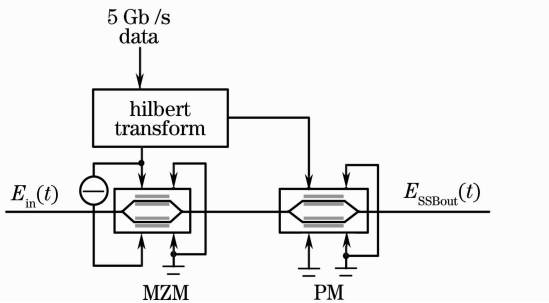


图 2 SSB 调制信号产生原理图

Fig. 2 Schematics of SSB signal generation

图 2 中 $E_{\text{in}}(t)$, $E_{\text{SSBout}}(t)$ 分别为输入、输出信号,对于双臂 MZM, $V_{\text{pi-rf}} = V_{\text{pi-dc}} = V_{\pi}$, $V_{\text{dc-upper}}(t) =$

$$V_{\text{dc-lower}}(t) = 0, \phi_{\text{upper}} = \frac{\pi V_{\text{rf-upper}}(t)}{V_{\pi}}, \phi_{\text{lower}} = \frac{\pi V_{\text{rf-lower}}(t)}{V_{\pi}},$$

因此 $h(t) = \frac{\exp(j\phi_{\text{upper}}) + \exp(j\phi_{\text{lower}})}{2}$, 输出为

$$E_{\text{OSSB-MZMout}}(t) = \frac{E_{\text{OSSB-MZMIn}}(t)}{2} \left\{ \exp\left[j \frac{\pi V_{\text{OSSB-MZMrf-upper}}(t)}{V_{\pi}} \right] + \exp\left[j \frac{\pi V_{\text{OSSB-MZMrf-lower}}(t)}{V_{\pi}} \right] \right\}, \quad (5)$$

式中 $V_{\text{OSSB-MZMrf-upper}}(t) = xV_{\pi}m(t) - V_{\pi}/4$, $V_{\text{OSSB-MZMrf-lower}}(t) = -xV_{\pi}m(t) + V_{\pi}/4$, 图 2 中的 PM 是相位调制器,其器件本质仍然是双臂平衡 MZM, 参数为 $V_{\text{dc-upper}}(t) = V_{\text{dc-lower}}(t) = 0, \phi_{\text{upper}} = \frac{\pi V_{\text{PMrf-upper}}(t)}{V_{\text{pi-rf}}}, \phi_{\text{lower}} = 0$ 。

输出为

$$E_{\text{PMout}}(t) = E_{\text{PMIn}}(t) \left\{ \exp\left[j \frac{\pi V_{\text{PMrf-upper}}(t)}{V_{\pi}} \right] \right\}, \quad (6)$$

式中 $\pi/V_{\pi} = \Delta\theta, V_{\text{PMrf-upper}}(t) = xV_{\pi}\hat{m}(t)$ 。

输出用泰勒级数表示为

$$E_{\text{OSSBout}}(t) = \exp(j\omega_0 t) \cdot \left\{ \left[\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}zm(t) - \frac{1}{2\sqrt{2}}z^2m^2(t) - \frac{1}{6\sqrt{2}}z^3m^3(t) + \dots \right] + j \left[\frac{1}{\sqrt{2}}z\hat{m}(t) + \frac{1}{\sqrt{2}}z^2m(t)\hat{m}(t) + \dots \right] \right\}, \quad (7)$$

取一阶泰勒级数,则有

$$E_{\text{OSSBout}}(t) = \exp(j\omega_0 t) \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}zm(t) + j \frac{1}{\sqrt{2}}z\hat{m}(t) \right], \quad (8)$$

此时取 $z = \pi x$ 。

3 结果及分析

图 3 所示为实现 0.1 THz ToF 系统 DSSB 调制的方案图。分布反馈激光器发出的连续光波输入 50 Gb/s 信号调制的双臂平衡 MZM, 经过载波抑制调制后, 将第一副载波的上、下边带滤出后分别传输,

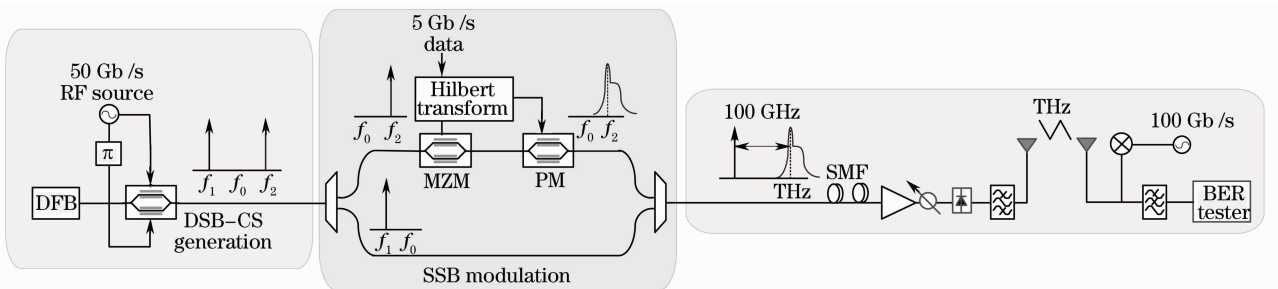


图 3 基于 DSSB 调制的 ToF 系统方案图

Fig. 3 Schematics of the DSSB-ToF transmitter

上边带经由 MZM 和调相器级联以 SSB 调制方式加载 5 Gb/s 的数据。调制后的上边带与下边带拍频生成 0.1 THz 载波在光纤中传输,经射频天线发射后,再经过射频接收解调。图 4 所示为 0.1 THz ToF 系统中 DSB 调制方式的方案图。与图 3 DSSB 方案的不同之处在于,上边带调制方式采取双臂

MZM 直接进行双边带调制,加载 5 Gb/s 的数据。图 5 所示为 DSSB 和 DSB 调制信号的光谱图和 ToF 系统拍频后的电谱图。

图 6 为 SSB 和 DSB 调制信号经过 10 km 单模光纤传输后的功率衰落特性。其中图 6 (a) 是非 ToF 系统的两种信号的功率衰减特性对比曲线图,

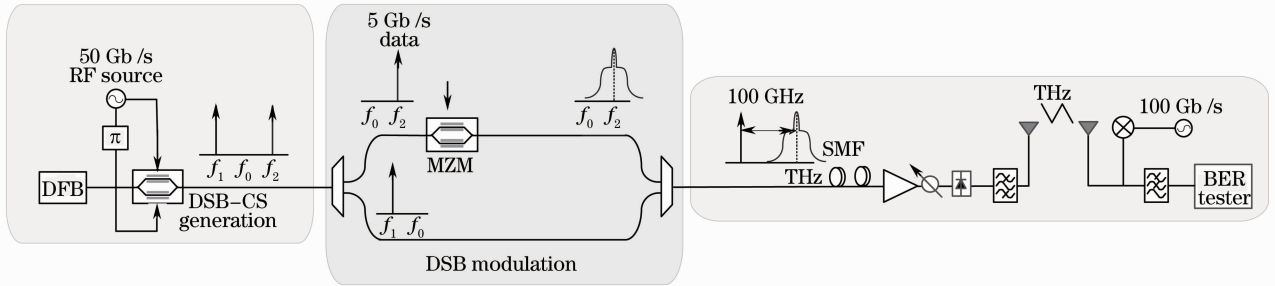


图 4 基于 DSB 调制的系统方案图

Fig. 4 Schematics of the DSB transmitter

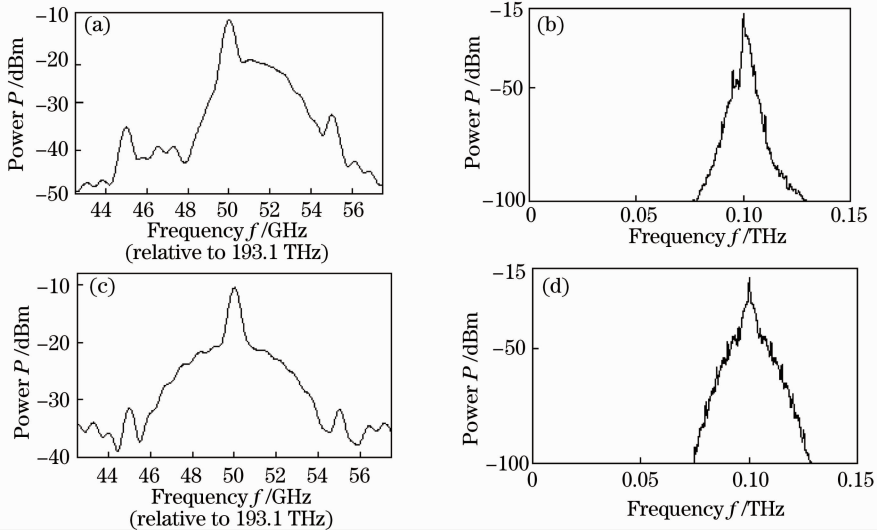


图 5 (a) SSB 信号光谱图; (b) SSB 信号电谱图; (c) DSB 信号光谱图; (d) DSB 信号电谱图

Fig. 5 (a) Optical spectrum for SSB signals; (b) electrical spectrum for THz signals modulated by SSB; (c) optical spectrum for DSB signals; (d) electrical spectrum for THz signals modulated by DSB

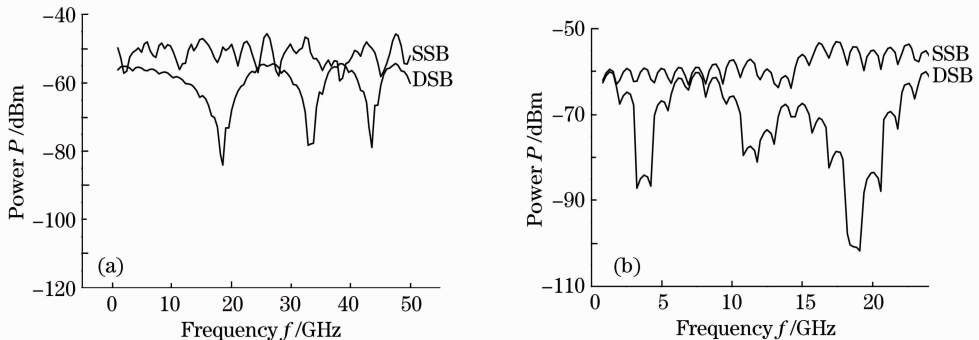


图 6 SSB 和 DSB 调制信号经过 10 km 单模光纤传输后的功率衰落特性。(a)非 ToF 系统中; (b)ToF 系统中

Fig. 6 Measured RF power for optical SSB and DSB modulation after transmission over 10 km singlemode fiber.

(a) not in the ToF system; (b) in the ToF system

图中清晰可见文献[15]中提到的 DSB 调制信号色散衰落节点信号消失的现象。DSB 调制信号衰落节点的衰落比达到 -25 dB, 而且衰落次数也较多; 而 SSB 调制信号曲线相对平滑, 抖动在 5 dB 范围内, 几乎没有出现信号消失的现象。图 6(b) 是 ToF 系统中两种信号功率衰减性对比曲线图, 从图中可以发现, ToF 系统中 DSB 调制信号稳定性更差, 最大衰落比达到 -40 dB, 而 SSB 的调制信号曲线却仍然保持平滑。两幅图的对比清晰地表明, DSB 调制方式所无法回避的色散衰落现象和 SSB 调制方式对抗衰落现象的能力。

为了测量出系统的传输特性, 将 DSSB 调制信号置于 16 ps/(km·nm) 的单模光纤中传输。图 7 和图 8 分别是 DSB 和 DSSB 调制系统传输特性曲线图和眼图。从图 7 和图 8 中嵌入的眼图可以发现, 对于每种调制方式, 随着传输距离的延长, 接收到的信号均存在时间和幅度上的抖动, 但是 DSB 信号的时间抖动现象更为明显, 这主要是光纤信道色散引起的; 相比较, DSSB 解调信号的抖动便平缓很多, 即便是传输 100 km 后, 也有很好的稳定性。对比两幅图中的(a)图, 同样可以发现, 传输距离达到 100 km 时, 信号解调后的 BER 值, 在图 7(a) 中的 DSB 调制方式中仅能大于 10^{-9} 数量级, 而图 8(a) 中的 DSSB 调制方案中却可达到 10^{-11} 数量级。这说明 DSSB 调制信号在长距离传输中的优势, 再次验证了在 DSB 调制方式中, 光纤色散引起的衰落效应对传输距离的限制。对比两副图的 BER 曲线族, 很明显随着传输距离的增加, DSSB 调制方式的接收机灵敏度变化区间较小, 而 DSB 调制方式则相反。

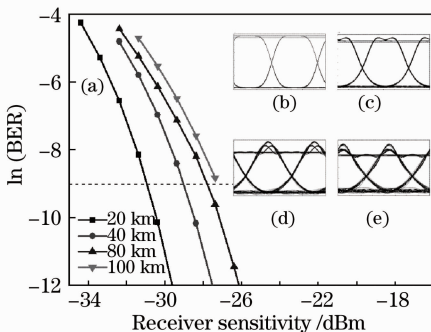


图 7 DSB 调制 5 Gb/s 信号传输 $40\sim 100$ km 后的 BER 曲线族 (a) 和眼图: (b) 背靠背; (c) 传输 40 km; (d) 传输 80 km; (e) 传输 100 km

Fig. 7 BER performance (a) and eye diagram for the received 5 Gb/s DSB signal: (b) back to back; (c) 40 km; (d) 80 km; (e) 100 km

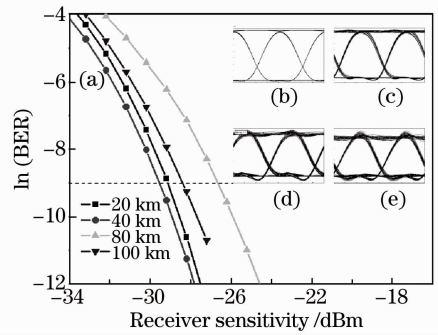


图 8 DSSB 5 Gb/s 信号传输 $40\sim 100$ km 后的 BER 曲线族 (a) 和眼图: (b) 背靠背; (c) 传输 40 km; (d) 传输 80 km; (e) 传输 100 km

Fig. 8 BER performance (a) and eye diagram for the received 5 Gb/s DSSB signal: (b) back to back; (c) 40 km; (d) 80 km; (e) 100 km

从图中可以看到, 光纤长度为 100 km 时, DSSB 调制接收机灵敏度为 -26.6 dBm; 而 DSB 调制, 在没有接收放大的情况下, 却得不到接收机灵敏度所对应的条件: BER 达到 10^{-9} 数量级。

4 结 论

提出了基于 DSSB 调制产生光纤载太赫兹波信号的新方案。该方案与传统 DSB 调制的频率选择性衰落做了对比, 说明 DSB 调制方式受光纤色散的影响产生严重的衰落现象, 而 SSB 调制方式却对其有良好的容忍度。对 DSSB 和 DSB 调制方式都进行了信号传输分析, 结果表明, DSSB 调制信号具有良好的传输特性, 该信号单模光纤传输 100 km, 接收机灵敏度仅有 -26.6 dBm, 证明了 DSSB 调制在未来光纤载太赫兹波通信系统中的应用前景。

参 考 文 献

- 1 R. Piesiewicz, C. Jansen, D. Mittleman *et al.*. Scattering analysis for the modeling of THz communication systems [J]. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, 2007, **55**(11): 3002~3009
- 2 T. Kurner, M. Jacob, R. Piesiewicz *et al.*. An integrated simulation environment for the investigation of future THz communication systems: Extended version [J]. *Simulation*, 2008, **84**(2-3): 123~130
- 3 H. Liu, H. Luo, C. Song *et al.*. Terahertz quantum well photodetectors [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, **14**(2): 374~377
- 4 M. Su, S. Carter, M. Sherwin *et al.*. Voltage-controlled wavelength conversion by terahertz electro-optic modulation in double quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(9): 1564~1566
- 5 D. R. Grischkowsky. Optoelectronic characterization of transmission lines and waveguides by terahertz time-domain spectroscopy [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(6): 1122~1135

- 6 S. Reichel, R. Zengerle. Rectangular microstirp patch antenna design at THz frequency for short distance wireless communication systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(7): 1152~1157
- 7 Shao Yufeng, Li Jia, Cheng Lili *et al.*. Four serial differential phase-shift keying modulation formats for 100 Gbit/s transmission applications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 574~580
邵宇丰, 李 佳, 程黎黎 等. 四种级联差分相位调制码的 100 Gbit/s 传输[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 574~580
- 8 Shao Yufeng, Chen Lin, Wen Shuangchun *et al.*. A novel scheme for generation of optical dark return-to-zero label signals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1580~1584
邵宇丰, 陈 林, 文双春 等. 产生暗归零码光标记信号的新方案 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1580~1584
- 9 Du Haiwei. Research of terahertz wave radiation from photoconductor antenna [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(7): 45~48
杜海伟. 光电导天线太赫兹辐射研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(7): 45~48
- 10 H. Schmuck. Comparison of optical millimeter-wave system concepts with regard to chromatic dispersion [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(21): 1848~1849
- 11 F. Ouellette, J. Cliche, S. Gagnon. All-fiber devices for chromatic dispersion compensation based on chirped distributed resonant coupling [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(10): 1728~1738
- 12 T. Kuri, K. Kitayama. Optical heterodyne detection technique for densely multiplexed millimeter-wave-band radio-on-fiber systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(12): 3167~3179
- 13 Zhu Meiwei, Lin Rujian, Ye Jiajun *et al.*. Novel millimeter-wave radio-over-fiber system using dual-electrode Mach-Zehnder modulator for millimeter-wave generation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(4): 126~130
朱美伟, 林如俭, 叶家骏 等. 使用双电极 Mach-Zehnder 调制器产生毫米波的新型 mm-ROF 系统 [J]. *光电工程*, 2008, **35**(4): 126~130
- 14 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
- 15 M. Sieben, J. Conradi, D. E. Dodds. Optical single sideband transmission at 10 Gb/s using only electrical dispersion compensation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(10): 1742~1749

· 广 告 ·



全球专业的激光晶体和非线性光学晶体制造商

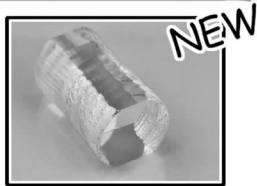


CIOE2010
第十二届
中国国际光电博览会

2010年9月6-9日 深圳会展中心
欢迎光臨我們的展位: 1号館411号

磁光晶体系列

铽镓石榴石 (TGG)



BBO Q-开关

BBO 普克尔盒的应用

- 1、高重复频率DPSS中Q开关的理想选择
- 2、用于高重复频率再生放大系统的控制
- 3、腔倒空系统
- 4、削波



Q开关驱动源



超长 Nd:YVO₄ 晶体



光学产品

产品系列

1. 非线性光学晶体
2. 激光晶体
3. 绿光、蓝光晶体组件
4. 声光和电光晶体
5. 双折射晶体
6. 闪烁晶体
7. 激光光学产品
8. 通讯光学产品
9. 红外光学产品
10. Q-开关、温控炉等