

基于光相位锁定的载波可变光的毫米波产生技术

韩丙辰^{1*}, 于晋龙², 王文睿², 王菊², 杨恩泽²

(1. 山西大同大学固体物理研究所, 山西 大同 037009; 2. 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要:提出和实现了一种新型适用于光/无线混合接入的光子载微波产生方案. 该方案利用直接调制分布反馈式半导体激光器可以产生宽谱信号的特点, 将较低频率正弦信号直接调制半导体激光器, 在半导体激光器中进行频谱展宽, 然后把宽谱信号注入到多个半导体激光器中进行相位锁定从而作为相干锁定光源. 用上述光源在不同波长加载不同信号进行传输, 在接收端使用不同通带特性的光学滤波器对信号进行处理, 可以选择接收基带信号、光子微波时钟信号、上行光源或不同载波频率的光子微波调制信号. 作为验证, 分别完成了2.5 Gbps基带信号、20 GHz和40 GHz光副载波调制信号的产生与接收. 因为受限于试验条件, 只进行了原理验证, 但该系统理论上可集成波导设计, 无需高频调制器件, 并可生成更高载频光子微波信号, 有利于未来的光/无线混合接入和超密集波分复用系统.

关键词:光通信; 光接入; 光微波; 相位锁定

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A

Optical millimeter-wave generation with subcarrier variable based on optical phase locking

HAN Bing-Chen^{1*}, YU Jin-Long², WANG Wen-Rui², WANG Ju², YANG En-Ze²

(1. Institute of Solid State Physics, Shanxi Datong University, Datong 037009, China;

2. School of Electronic & Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A novel scheme for the generation of photonic millimeter-wave was proposed, which is applicable to optical/wireless hybrid access network. Based on the characteristic that a wide spectrum signal can be produced by modulating a distributive feedback semiconductor laser, a laser is directly modulated with low-frequency sinusoidal signal. The laser's spectrum is broadened and then injected into a series of phase-locked semiconductor lasers to make themselves coherent light sources. The light sources are used to load different signals at different wavelengths for transmission. At the receiving end, optical filters with different passband characteristics are used for signal processing, selectively receiving the baseband signal, optical microwave clock signal, and the uplink light sources or up conversion signals modulated with different subcarrier frequency. As verification, the generation and reception of subcarrier-modulated optical signal for 2.5 Gbps baseband signal, 20 GHz and 40 GHz are completed. Due to the limited experimental conditions, only the theoretical verification was conducted. Though, as the system can be integrated with waveguide design, an optical microwave signal with higher carrying frequency can be generated. It is very beneficial to future optical/wireless hybrid access and the system of ultra-dense wavelength division multiplexing.

Key words: optical communication, optical access, radio over fiber (RoF), optical phase locking

PACS: 07.57.Hm

引言

在当今的接入网技术中, 无线化和宽带化无疑是发展的方向. 由于光载微波 (Radio over Fiber,

RoF) 技术结合了光纤和微波/毫米波的特点, 解决了高频载波调制信号的传输问题, 能实现大容量、低成本的微波/毫米波的光层传输和超宽带无线接入, 成为了当前的研究热点. RoF 系统基于简化基站功

收稿日期: 2013-05-31, 修回日期: 2013-09-19

Received date: 2013-05-31, revised date: 2013-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(61205061); 山西省青年科技研究基金(2011021018)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61205061)

作者简介 (Biography): 韩丙辰(1976-), 男, 山西省侯马市人, 副教授, 博士, 主要研究领域为光纤通信与光子微波技术. E-mail: han_bchen@126.com

能的理念所设计,复杂的数据处理和业务数据汇集集中在光线路终端(OLT),而将基带数据调制的微波/毫米波(副载波)加载到光上利用光纤传送到远端节点后经光电转换放大并通过天线发射形成无线覆盖.

目前光载微波接入技术的研究主要集中在将基带信号全光上变频到微波/毫米波频段.如采用马赫曾德强度调制器(MZM)的调制特性将调制信号的载频二倍频或者四倍频^[1];使用非线性介质如半导体光放大器(SOA)等器件中的交叉增益调制(XGM)^[2]或者四波混频(FWM)效应^[3,4]产生的高阶非线性进行上变频.还有报道采用了基于注入锁定半导体激光器无微波本振直接将基带信号上变频至副载波调制的方案^[5].

文中提出了一种适用于光有线/无线混合接入的新型 RoF 系统方案.采用注入锁定产生相位相干光源并加载数据,在接收端通过滤波和光探测器接收,产生基带和上变频光子微波信号.该方案中上变频部分无需高频本振和调制器,载频可变,并且发射部分可光集成.作为系统验证,首先使用单频信号直接调制 DFB 激光器产生连续宽谱作为种子光源,然后分别注入一系列半导体激光器使其与种子光源相位同步锁定.被锁定激光器作为下行信号光源被调制数据或者直接传输至终端作为上行光源,在接收端通过使用不同通带特性和中心波长的滤波器进行选择滤波,可滤出需要的基带信号、不同载波频率的副载波调制信号、时钟信号或者光载波.在试验中采用了 10 GHz 正弦直调 DFB 作为种子光源,选取了波长间隔为 0.16 nm(20 GHz)的 3 个激光器作为相位锁定光源,完成了 25 km 两路 2.5 Gbps 基带信号和一路光载波的传输.并且在接收端,实现了基带信号,20 GHz 和 40 GHz 子载波光微波信号的接收.

1 系统设计及原理分析

如图 1 所示为基于光学相位锁定的光/无线混合 RoF 接入系统结构图.

在中心局(center station, CS),由模式间隔为 ω_0 的超连续谱光源产生的种子光信号通过耦合器或者阵列波导光栅(AWG)分别注入锁定各个分布反馈式半导体激光器(DFB-LD).在发射端相邻波长光源只有一路加载数据,另外一路波长光源直接传输至接收端,用于生成光微波信号和作为上行数据光源.承载了各种业务数据的多波长信号汇聚至一路,送入光纤链路中以便向终端用户传输.在该方

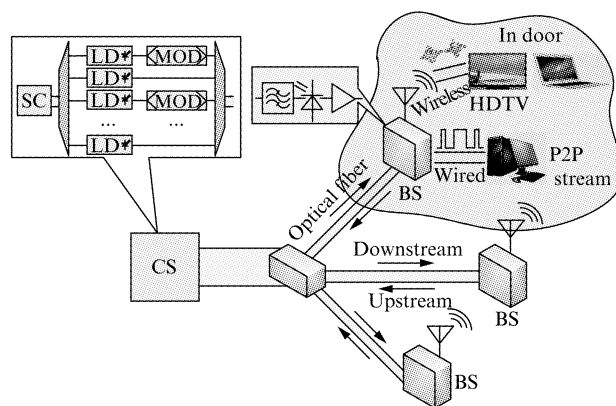


图 1 基于光学相位锁定的光/无线混合 RoF 接入系统结构
Fig.1 Optical / wireless hybrid RoF access system structure based on optical phase-locked

案中,可以将分路以及合路的耦合器或者 AWG,激光器和调制器等使用 III-V 族材料如 InP 等进行光集成^[6],避免因为光纤结构引入的偏振和相位抖动等干扰.在基站(Base station, BS)端,通过光纤光栅或者其他带通滤波器进行选择滤波,得到相应的基带信号、光载波信号、光本振信号或者不同载频的光微波信号.光基带信号兼容传统的有线接入网络,光载波信号可作为上行数据光源,光本振信号可以用于微波信号的解调,光微波信号用于发送宽带无线信号.值得注意的是,本方案中承载无线数据的光子微波信号载频可变,其步进频率为 $2\omega_0$.以目前的技术,波长间隔 10 GHz 的滤波通道已经可以实现^[7],意味着上述光子微波载频可以为 20 GHz、40 GHz、60 GHz 甚至更高.

产生超连续谱的方案目前有很多报道^[8,9],本试验中采用了直调 DFB-LD 方式,利用其啁啾产生宽谱作为种子光源^[10].本文重点在于注入锁定与微波信号生成,外部注入光信号条件下被注入激光器的复场强差分方程和载流子速率方程^[11,12]包括以下三项:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \{g[N(t) - N_{tr}] - \gamma_p\}S(t) + 2\kappa \sqrt{S_{ML}(t)S(t)} \cos[\phi(t) - \phi_{ML}(t)] \quad (1)$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{\alpha}{2} \{g[N(t) - N_{tr}] - \gamma_p\} - \kappa \sqrt{\frac{S_{ML}(t)}{S(t)}} \sin[\phi(t) - \phi_{ML}(t)] - \Delta\omega_c \quad (2)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = J(t) - \gamma_N N(t) - g[N(t) - N_{th}]S(t) \quad (3)$$

其中, $S(t)$, $\phi(t)$ 和 $N(t)$ 分别为被注入激光器(Slave Laser, SL)的光子密度,光场相位和载流子

浓度; $S_{ML}(t)$ 和 $\phi_{ML}(t)$ 分别为主激光器 (Master Laser, ML) 注入至 SL 激光器的光子密度与光场相位. $\Delta\omega_c$ 为 ML 与 SL 激光器自由振荡频率差, κ 为耦合率. $g, N_h, \alpha, J, \gamma_N$ 和 γ_P 分别为 SL 激光器的线性增益系数, 载流子浓度阈值, 线宽增强因子, 偏置电流, 载流子复合速率和光子衰减率. 在假定注入功率为恒值的情况下, 即 $S_{ML}(t) = S_{ML}, \phi(t) = 0$, 联立 1-3 式可得到稳定锁定的相位条件须满足:

$$\cot^{-1} \alpha < \varphi_0 < -\frac{\pi}{2}, \quad (4)$$

对应于式(4)可以得到相应的注入锁定带宽范围:

$$-\sqrt{1 + \alpha^2} \kappa \sqrt{\frac{S_{ML}}{S_0}} < \Delta\omega_L < \kappa \sqrt{\frac{S_{ML}}{S_0}}, \quad (5)$$

其中 S_0 和 φ_0 为 SL 激光器稳态光子密度和相位. 由式(5)可以得出, 注入锁定带宽与耦合率, 注入功率比和线宽增强因子有关系. 在特定的 SL 激光器条件下, 注入锁定主要取决于注入功率比和注入失谐频率, 但是实际注入锁定带宽并不对称^[13], 主要处于频率负失谐区间. 另外需要指出的是, 因为基于多量子阱材料的半导体激光器对注入信号偏振敏感, 只有横电磁波 (TE) 分量参与注入锁定过程.

注入锁定的激光器经过外调制后的信号为:

$$E_i(t) = A_i(t) \exp(j\omega_i t), \quad (6)$$

其中 $E_i(t)$ 为中心波长 λ_i 的调制信号复光场表达式, $A_i(t)$ 和 ω_i 为对应的基带信号和光角频率, $\omega_0 = \omega_i - \omega_{i-1}$ 为波长间隔. 为了统一表达式, 此处未调制信号对应的 $A_i(t)$ 为常数, 表示光功率. 经过耦合器合并为一路后的光场 (忽略耦合损耗) 即:

$$E_l = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i. \quad (7)$$

在接收端通过光滤波器选择不同波长, 在此假设选择 E_1 和 E_3 , 其中 E_3 为未调制信号. 经过光电探测器后, 其光电流表达式为

$$I_F(t) = (E_1(t) + E_3(t))(E_1(t) + E_3(t))^* = \frac{R}{2} \{P_1 + P_3 + 2\sqrt{P_1 P_3} \cos[\omega_0 t + \theta_1(t) - \theta_3(t)]\}, \quad (8)$$

其中 $P_{1,3} = |A_{1,3}|^2/2$, $R = \frac{e\eta}{h\omega_1}$, $\theta_{1,3}(t)$ 为 $E_{1,3}$ 的相位变化, 由于 A_3 为常量, 并且 E_1 和 E_3 光相位锁定, 故 $\theta_1(t) - \theta_3(t) = \Delta\theta$, 式(7)可改写为:

$$I_F = R [|A_1|^2 + |A_3|^2 + |A_1| |A_3| \cos(2\omega_0 t + \Delta\theta)] \quad (9)$$

由式(9)可以看出, 通过光电探测器后的光电流包括了基带信号 A_1 , 直流光信号 A_3 以及光学上

变频信号, 上变频的频率为 $2\omega_0$. 同理, 通过选择不同的波长滤波, 可以得到以 $n\omega_0$ (n 是整数) 为载频的上变频信号或者本振信号. 此外, 上述分析也适用于多进制调制和正交调制, 如 PSK、QPSK 和 QAM 等.

2 试验及结果分析

如图 2 所示为验证试验结构图, 在此由于试验条件限制, 选取了 3 个波长进行验证. 信号发生器产生的 10 GHz 正弦信号通过放大器放大后直调激光器 DFB0, 产生宽谱直调光信号, 然后通过可调衰减器 OTA 进行功率调整后输入至 1:4 光耦合器进行信号分配.

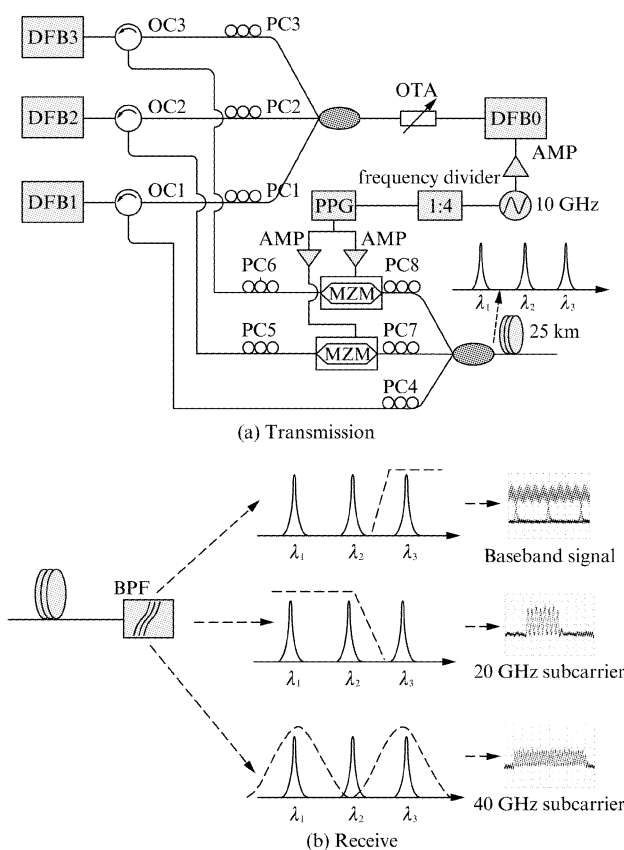


图 2 多载波可选 RoF 试验结构图 (a) 发送端; (b) 接收端

DFB: 分布反馈激光器; PC: 偏振控制器; MZM: 马赫曾德强度调制器; OC: 光环形器; AMP: 电放大器; OTA: 光可调衰减器; PPG: 脉冲发生器; BPF: 带通滤波器
Fig. 2 An optional multi-carrier RoF test structure.
(a) Transmission. (b) Receiver

耦合器输出信号分别通过 PC1、PC2、PC3 进行偏振态调整进入光环形器 OC1、OC2、OC3 的 1 口, 并通过环形器 2 口注入至 DFB1、DFB2、DFB3 进行

光频率/相位锁定,光环形器的3口分别输出信号作为相干锁定光源. DFB2和DFB3输出信号分别加载由PPG产生的2.5 Gbps基带信号,其中PC5和PC6用于调整进入MZM的光偏振态,PC7和PC8用于调整进入耦合器的光偏振态,DFB1的输出信号直接通过PC4调整偏振态后与PC7和PC8的输出信号一起接入耦合器合并成为一路信号并经过25 km普通单模光纤(SMF)传输测试. 经过传输的信号在接收端(BS),通过不同的光带通滤波器进行谱线操作,可以获得相应的基带或者不同副载波的光微波信号.

DFBO激光器的自由振荡输出波长为1554.0 nm,偏置电流为72 mA,输出光功率为2 dBm,信号驱动功率为23 dBm. 由于直调激光器电流变化伴随频率变化,所以直接调制后光谱会展宽,如图3(a)所示输出直调光谱宽度约为1 nm,光谱仪分辨率为0.05 nm. DFB1-DFB3的偏置电流均为30 mA,输出功率为2 dBm. 首先通过微调DFB1-DFB3的偏置电流以及温度,使得其波长间隔约为0.16 nm (20 GHz),对应的中心波长分别为:1553.60 nm,1553.76 nm和1553.92 nm. 试验中注入至激光器的光功率均为-30 dBm,由于注入至激光器腔内的信号只有TE模式上的分量参与锁定,所以可通过PC来调整进入激光器的有效注入强

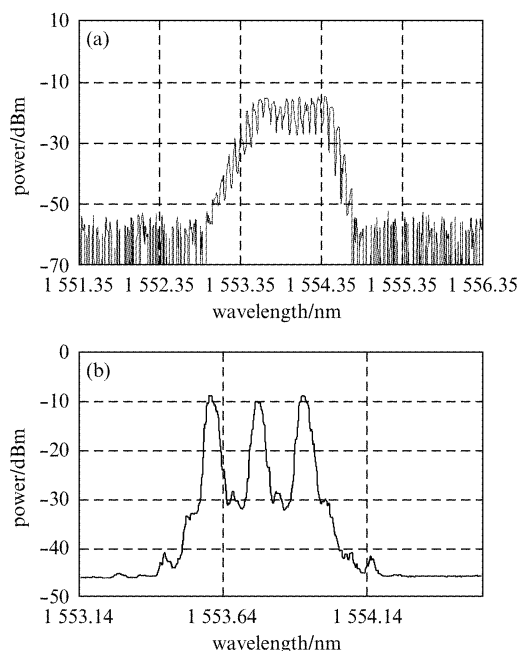


图3 (a) 直调输出光谱(b) 注入锁定输出光谱
Fig. 3 (a) Directly modulated output spectrum.
(b) Injection-locked output spectrum

度. 微调DFBO激光器的温度使得其各谐波模式与待注入波长匹配,同时调整注入偏振态,使注入光与DFB1-DFB3分别锁定,图3(b)所示为注入锁定后发送端的光谱图.

如图4所示为接收基带信号,由于缺少光纤光栅,在此采用了50 GHz通道间隔DWDM的通带边缘进行滤波. 通过图3(b)与图4(a)对比可知,通过DWDM后,系统只输出了中心波长为1553.92 nm的信号,即2.5 Gbps的基带信号. 如图4(b)所示为

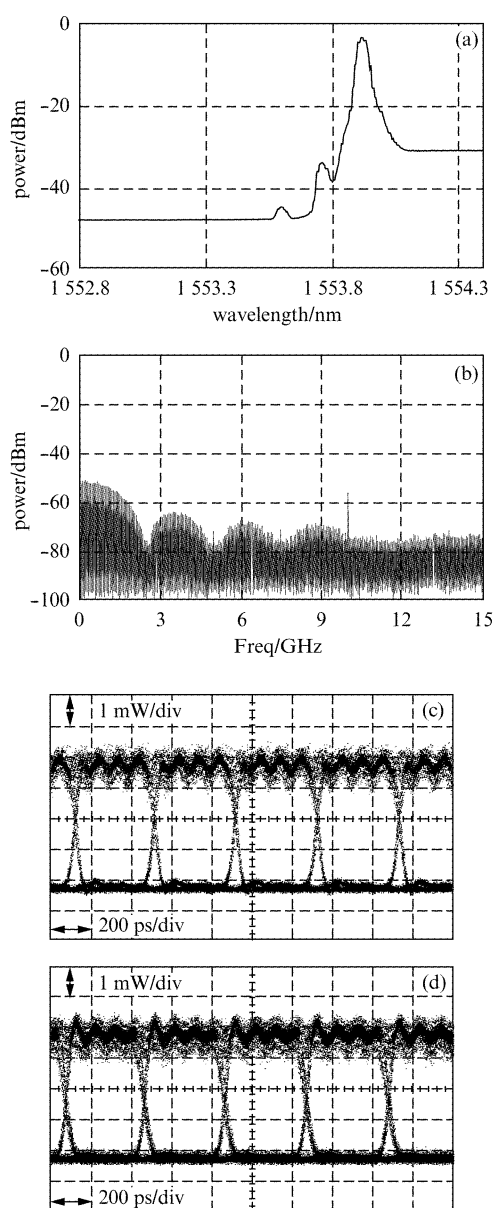


图4 基带信号接收 (a) 光谱图, (b) 电谱图, (c) 未传输接收眼图, (d) 传输25 km接收眼图
Fig. 4 The baseband signal reception, (a) spectrum, (b) power spectrum, (c) receiving eye without been transferred, and (d) receiving eye with transmitted 25 km

接收端频谱图,图 4(c)和 4(d)分别为未传输和传输 25 km 普通单模光纤的眼图波形对比. 同理,在接收端使用 DWDM 将 1 553.60 nm 的直流光和 1 553.76 nm 的基带信号滤出,得到的光谱如图 5(a)所示. 如上文分析,由于 1 553.60 nm 和 1553.76 nm 波长之间具有相干性, DWDM 输出的光信号经过光电探测器进行转换后,会出现上变频的微波信号. 图 5(b)所示为其频谱图,图中包含了载波频率为 20 GHz 的调制信号,图 5(c)~(d)和图 5(e)~(f)为未传输与传输后接收端信号的 pattern 模式波形和载波细节波形对比. 为了进一步产生 40 GHz 载频的光微波信号,需要将波长为 1 553.60 nm 和 1 553.92 nm 的光信号滤出. 试验中使用偏振干涉仪 (PI) 代替光栅在接收端对信号

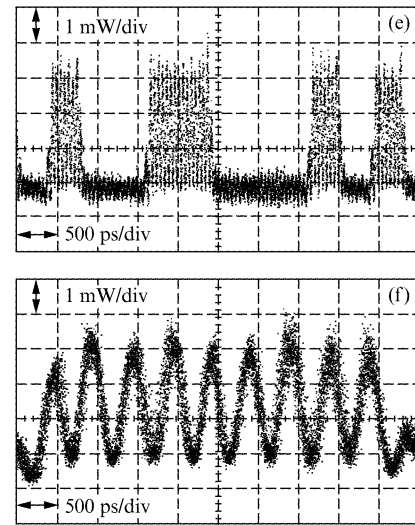
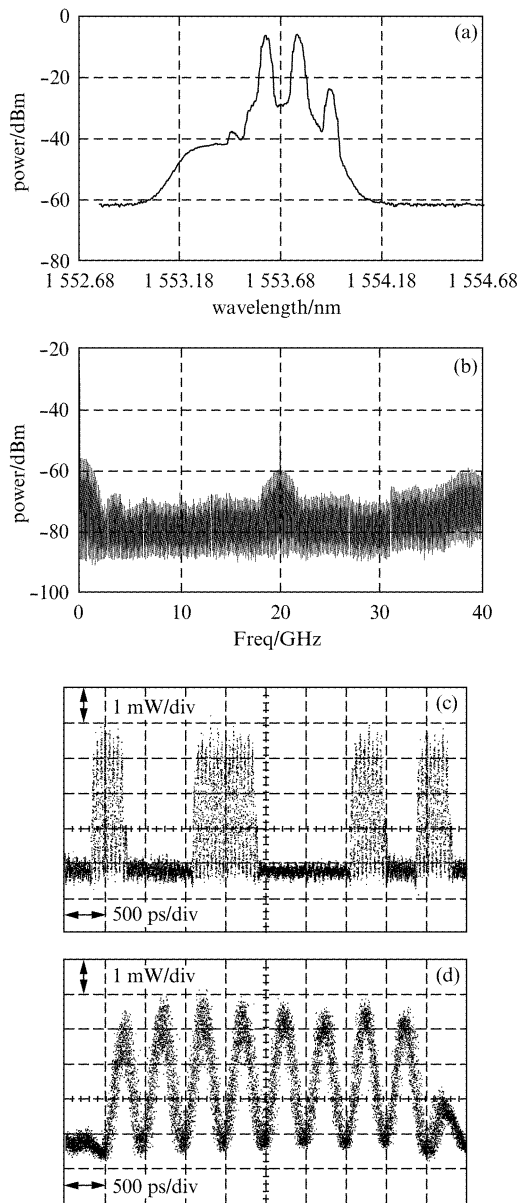
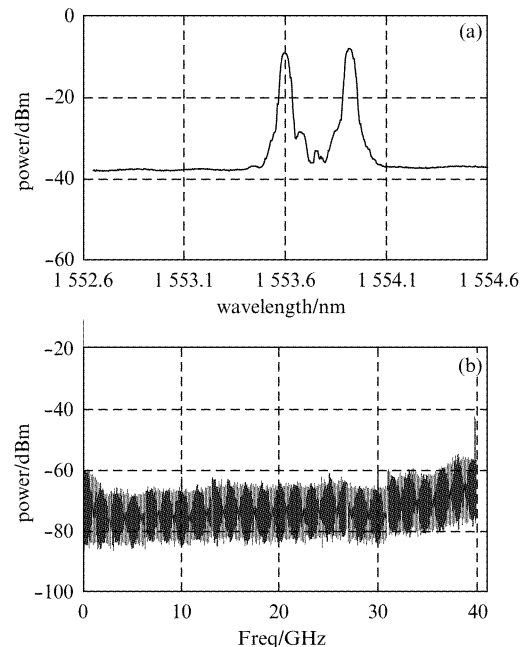


图 5 20 GHz 光副载波调制信号的产生与接收 (a) 20 GHz 副载波调制光谱图 (b) 频谱图 (c) 未传输 pattern 模式波形 (d) 未传输副载波信号细节 (e) 传输后 pattern 模式波形 (f) 传输后 20 GHz 载波细节

Fig. 5 20 GHz optical subcarrier modulation signal generation and reception. (a) 20 GHz subcarrier modulation spectrum. (b) Frequency spectrum. (c) The waveform pattern was not transferred. (d) The details of subcarrier signal is not transmitted. (e) Pattern mode waveform after transmission. (f) 20 GHz carrier details after transmission

进行滤波处理,如图 6(a)所示为接收端光谱图. 图 6(b)为载频为 40 GHz 的光微波信号频谱图,图 6(c)~(f)分别为 25 km 光纤传输前后的时域波形. 验证试验中发射端采用了光纤结构,DFBO 发出的光通过不同的光路最后耦合至一路,受光纤结构影



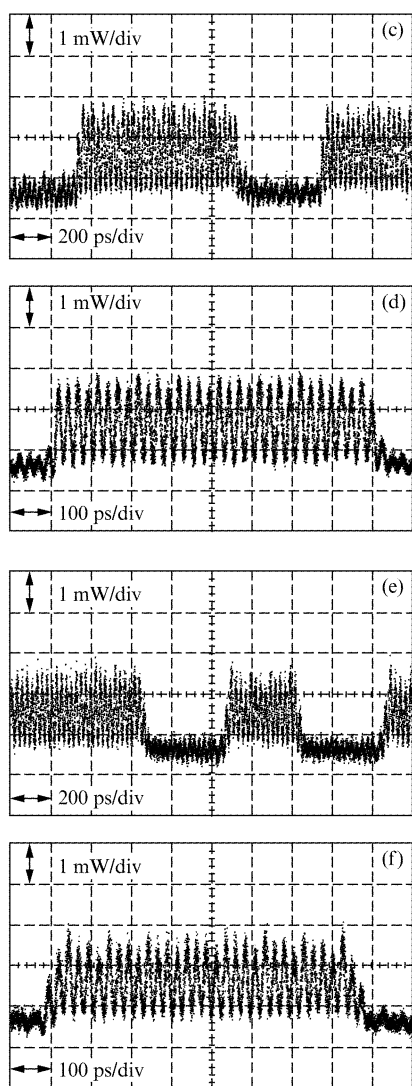


图6 40 GHz 光副载波调制信号的产生与接收(a) 40 GHz 副载波调制光谱图(b) 频谱图(c) 未传输 pattern 模式波形(d) 未传输载波细节(e) 传输后 pattern 模式波形(f) 传输后 40 GHz 载波细节

Fig. 6 40 GHz optical subcarrier modulation signal generation and reception. (a) 40 GHz subcarrier modulation spectrum. (b) Frequency spectrum. (c) The waveform pattern was not transferred. (d) The details of subcarrier signal is not transmitted. (e) Pattern mode waveform after transmission. (f) 40 GHz carrier details after transmission

响,接收端的不同波长之间相干性受到影响,导致信号不稳定.假如采用光集成设计,将避免信号不稳定的因素,使该系统灵活选择接收信号频段,可同时承载不同数据业务.

3 结论

为了减小系统复杂度,对 SOA 中频谱展宽的方

案进行了改进,利用直调信号直接产生宽谱的特点,使用 10 GHz 直调激光器通过注入锁定产生多路光相位相干的光源,完成了基带信号、20 GHz 微波信号、40 GHz 毫米波信号同时传输的实验.该方案一方面可以通过扩展相干光源的数量,产生更高频率的光毫米波信号,另一方面在无需改变发射端结构的前提下,在接收端通过选择滤波器可以灵活产生不同频段的信号.因为受限于试验条件,只进行了原理验证,但该系统理论上可集成波导设计,并可生成更高载频光子微波信号,将有利于未来的光/无线混合接入和超密集波分复用系统.

References

- [1] Hao Chi, Jianping Yao. Frequency quadrupling and upconversion in a radio over fiber link [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(15): 2706–2711.
- [2] Jun-Hyuk Seo, Chang-Soon Choi, Young-Shik Kang, et al. SOA-EAM Frequency Up/Down-Converters for 60-GHz Bi-Directional Radio-on-Fiber Systems [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, **54**(2): 959–966.
- [3] Dong Z, Cao Z, Lu J, et al. All-Optical Up-Conversion of Millimeter-Wave Signals for ROF System Using Optical Carrier Suppression-Based Dual-Pump FWM in an SOA. *Optical Fiber Communication Conference*, 2009 [C].
- [4] Xu L, Li C, Lo S M G., et al. Millimeter wave generation using four wave mixing in silicon waveguide. 2010 15th *Optoelectronics and Communications Conference (OECC)*, 2010 [C]: 860–861.
- [5] Bo Wu, Yu Jinlong, Zhang Z, et al. A novel and tunable frequency-upconversion based on FP-LD injection of one low bit-rate signal without any local oscillator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(14): 1027–1029.
- [6] Soares, F M, Baek J H, Fontaine N K, et al. Monolithically Integrated InP Wafer-Scale 100-Channel \times 10-GHz AWG and Michelson Interferometers for 1-THz-Bandwidth Optical Arbitrary Waveform Generation [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2010.
- [7] Baek J H, Soares F M, Seo S W, et al. 10-GHz and 20-GHz channel spacing high-resolution AWGs on InP [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(5): 298–300.
- [8] Takara H, Ohara T, Mori K, Sato, et al. More than 1 000 channel optical frequency chain generation from single supercontinuum source with 12.5 GHz channel spacing [J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(25): 2089–2090.
- [9] Horak P, Chen K K, Alam S, et al. High-Power Supercontinuum generation with picosecond pulses. 2010 12th *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2010 [C].
- [10] Hao Hu, Jinlong Yu, Zhang Litai, et al. Pulse source based on directly modulated laser and phase modulator [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(14): 8931–8937.
- [11] Lau E K, Liang Jie Wong, Wu M C. Enhanced modulation characteristics of optical injection-locked lasers: A tutorial [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, (下转第 545 页)

- [42] Zengeya F M, Mutanga O, Murwira A. Linking remotely sensed forage quality estimates from WorldView-2 multi-spectral data with cattle distribution in a savanna landscape [J]. *Int J Appl Earth Obs*, 2013, **21**: 513 - 524.
- [43] ZHANG Xiu-Ying, FENG Xue-Zhi, JIANG Hong. Feature space optimization of object-oriented classification [J]. *Journal of Remote Sensing* (张秀英, 冯学智, 江洪. 面向对象分类的特征空间优化. *遥感学报*), 2009, **13** (4): 664 - 669.
- [44] TAO Chao, TAN Yi-Hua, CAI Hua-Jie, et al. Object-oriented method of hierarchical urban building extraction from high-resolution remote-sensing imagery [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (陶超, 谭毅华, 蔡华杰, 杜博, 田金文. 面向对象的高分辨率遥感影像城区建筑物分级提取方法. *测绘学报*), 2010, **39** (1): 39 - 45.
- [45] SU Wei, LI Jing, CHEN Yun-Hao, et al. Object-oriented urban land-cover classification of multi-scale image segmentation method—a case study in Kuala Lumpur city center, Malaysia [J]. *Journal of Remote Sensing* (苏伟, 李京, 陈云浩, 等. 基于多尺度影像分割的面向对象城市土地覆被分类研究——以马来西亚吉隆坡市城市中心区为例. *遥感学报*), 2007, **11** (4): 521 - 530.
- [46] NIE Yong, ZHANG Yi-Li, LIU Lin-Shan, et al. Monitoring glacier change based on remote sensing in the Mt. Qomolangma national nature preserve, 1976-2006 [J]. *Acta Geographica Sinica* (聂勇, 张懿锂, 刘林山, 等. 近 30 年珠穆朗玛峰自然保护区冰川变化的遥感监测. *地理学报*), 2010, **65** (1): 13 - 28.
- [47] DU Feng-Lan, TIAN Qing-Jiu, XIA Xue-Qi, et al. Object-oriented image classification analysis and evaluation [J]. *Remote Sensing Technology and Application* (杜凤兰, 田庆久, 夏学齐, 等. 面向对象的地物分类法分析与评价. *遥感技术与应用*), 2004, **19** (1): 20 - 23.
- [48] CHEN Yun-Hao, FENG Tong, SHI Pei-Jun, et al. Classification of remote sensing image based on object-oriented and class rules [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (陈云浩, 冯通, 史培军, 等. 基于面向对象和规则的遥感影像分类研究. *武汉大学学报: 信息科学版*), 2006, **31** (4): 316 - 320.

(上接 526 页)

- 2009, **15** (3): 618 - 633.
- [12] CH Henry, NA Olsson, Dutta NK. Locking range and stability of injection locked 1.54 μm InGaAsP semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1985, **21** (8): 1152 - 1156.
- [13] Hyuk-Kee Sung, Lau, E. K., Wu M C. Optical Properties and Modulation Characteristics of Ultra-Strong Injection-Locked Distributed Feedback Lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, **13** (5): 1215 - 1221.