

基于光纤参量环形镜的光毫米波副载波产生

李恒文 江 阳 徐 静 周竹雅 王顺艳

(贵州大学贵州省光电子技术与应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要 提出并验证了一种基于光纤参量环形镜(OPLM)和光纤光栅(FBG)的 60 GHz 光毫米波副载波产生方案。理论上分析了 OPLM 的原理特性,发现可以利用 OPLM 同时完成光子微波信号的高次谐波产生和抽运滤波,直接获得光毫米波副载波信号。在实验验证中,从 5 GHz 的基频信号出发,通过调制非线性和 OPLM 中的四波混频和滤波过程,完成高次谐波产生和抽运分离,成功得到 60 GHz 的光毫米波副载波信号,表现出良好的性能。

关键词 光纤光学;光纤参量环形镜;光毫米波副载波;四波混频;微波;光纤光栅

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.1006005

Optical Millimeter-Wave Sub-Carrier Generation Based on Optical Parametric Loop Mirror

Li Hengwen Jiang Yang Xu Jing Zhou Zhuya Wang Shunyan

(Laboratory for Photoelectric Technology and Application, Guizhou University,
Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract Based on a fiber optical parametric loop mirror (OPLM) and a fiber Bragg grating (FBG), a scheme of 60 GHz optical millimeter-wave sub-carrier generation is analyzed and demonstrated. The conclusion indicates that OPLM can be used to achieve high-order harmonic and pump filter of photonic microwave signals at the same time, then optical millimeter-wave subcarrier can be obtained by leaving only the high harmonics. In the experimental demonstration, utilizing 5 GHz baseband signal, high-order harmonic generation and separation of the pump can be achieved by modulating the nonlinear and four-wave mixing and filtering in OPLM. Eventually, the required 60 GHz optical millimeter-wave sub-carrier signals can be realized successfully. Which shows good performance.

Key words fiber optics; optical parametric loop mirror; optical millimeter-wave subcarrier; four-wave mixing; microwave; fiber Bragg grating

OCIS codes 060.1155; 060.2330; 060.2630; 060.4730

1 引 言

光纤通信系统具有低成本、大带宽和低损耗等优势,适合于长距离传输,已成为现代通信网络的主要力量。但是,无线通信系统具有可移动通信的优势,所以为了兼顾带宽和通信的灵活性,将光纤通信系统与无线通信系统相结合成为一种必然趋势,由此产生的光载无线(RoF)系统已成为目前研究的热点^[1,2]。

RoF 系统的主要思想是利用光纤将中心站的

无线信号传输到基站,通过基站的光电转换过程恢复无线信号并发射。为了满足无线通信部分的大带宽要求,目前的研究目标集中在 60 GHz 的载波频率上。由于 60 GHz 的频段是大气的高吸收区,因此可以有效地防止各基站间的串扰。但是随之而来的问题在于 RoF 需要的基站数量众多,为了降低整体系统的成本,必须简化基站结构,将高频无线载波的产生放在中心站。考虑到电子技术产生高频毫米

收稿日期: 2012-03-12; 收到修改稿日期: 2012-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(61061004)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0099)、贵州省优秀科技教育人才省长基金[(2009)98]、贵州省优秀青年科技人才专项基金[(2009)09]和贵州大学创新项目(2012022)资助课题。

作者简介: 李恒文(1987—),男,硕士研究生,主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail: hengwen_lee@163.com

导师简介: 江 阳(1975—),男,博士,教授,主要从事高速光纤通信系统和光微波等方面的研究。

E-mail: jiangyang415@163.com (通信联系人)

波信号的困难以及中心站的无线数据信号将通过光纤进行传输这两个因素,如何利用光子技术产生光波副载波就成为一个非常有意义的课题^[3-5]。

目前,已经有多种方法可以产生光毫米波。传统的方案大多是利用各种非线性效应,从一个低频信号出发产生高次光谐波分量,然后使用合适的光滤波器选择所需要的高次边带在光电探测器上拍出微波信号。产生高次光谐波分量的途径有利用马赫-曾德尔电光调制器(MZM)中的调制非线性^[6];光纤或者半导体光放大器(SOA)中的四波混频(FWM)效应^[7,8]等。在以上产生谐波的方法中,光纤中的 FWM 效应因具有实现条件容易,便于与光纤通信系统集成,是个很好的选择。从滤波角度而言,可以作为滤波器使用的光学器件主要有布拉格光纤光栅^[9](FBG)、阵列波导光栅^[10](AWG),法布里-珀罗干涉仪(FPF)型光滤波器^[11]等。这些方案的共同困难在于光滤波器中心波长需要与被选择的边带对准,这就要求滤波器具有较高精度的可调谐性;其次若原始光微波信号的基频较小,则还需要光滤波器具有很小的带宽。这就为从一个低频信号产生高频微波/毫米波信号带来了很大的困扰。针对以上困难,一些新的滤波方式也被提出。如使用受激布里渊散射(SBS)效应作为滤波系统产生光毫米波^[12],该方案解决了光源和滤波系统的波长匹配和带宽要求的难题,但是该方案是采用两级设计,高次

谐波的产生和滤波系统分离,一定程度上增加了系统的复杂性。

为了更有效地实现高次谐波产生和波长、带宽不敏感的滤波,本文提出并分析演示了一种基于光纤参量环形镜(OPLM)配合 FBG 的 60 GHz 光毫米波副载波产生系统。从 5 GHz 的基频信号出发,通过调制非线性和 OPLM 中的 FWM 过程完成高次谐波产生和抽运分离,在输出端只保留频率间隔为 60 GHz 的两个闲频光,得到所需要的光毫米波副载波信号。该方案是一种全新的边带选择滤波方式,将高次谐波产生和波长、频率透明的选频滤波有机地结合在一起,结构简单,理论上可以方便灵活地实现对任意波长,任意基频的边带选择滤波,产生所需要的光毫米波副载波。本方法克服了已有方案的不足,不受光源的波长和基频频率的影响,结构简单,能方便地与其它光纤器件连接,具有很好的实用性。

2 实验原理

基于 OPLM 的光毫米波副载波产生的基本结构如图 1 所示,其中 RF 为射频信号。由外腔可调激光器(ECL)产生的连续光,经过两级马赫-曾德尔调制器调制以后,被注入到 OPLM 进行更高次谐波产生和初次滤波,最后使用 FBG 进行二次滤波。

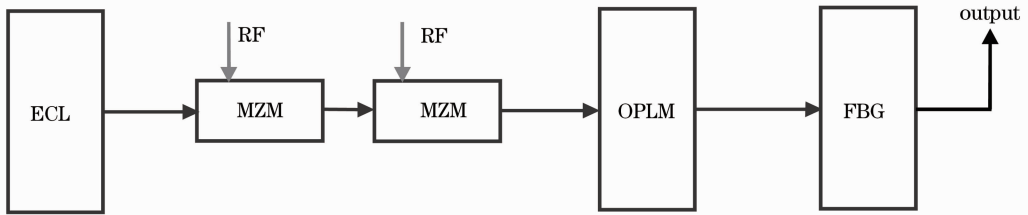


图 1 基于 OPLM 的光毫米波副载波产生的基本结构框图

Fig. 1 Basic structure diagram of optical millimeter-wave sub-carrier generation based on optical parametric loop mirror

ECL 光源产生频率为 ν_0 的连续光,其光场表达式为^[13]

$$E_{\text{int}}(t) = E_0 \cos(2\pi\nu_0 t + \varphi), \quad (1)$$

式中 E_0 为光场强度, φ 为光场初始相位。此时,第一个 MZM 的调制信号电压表达式为

$$v_1(t) = V_0 \cos(2\pi f t + \phi_1), \quad (2)$$

式中 V_0 和 ϕ_1 分别为输入到第一个 MZM 的 RF 信号的电压幅度和初始相位。调节第一个 MZM 的偏置电压,使其工作在最小传输模式,也就是抑制光载波(OCS)和偶次谐波分量方式调制,则第一个

MZM 输出光场的表达式为

$$E_{\text{out1}}(t) \propto E_0 J_1(\beta_1) \sin[2\pi(\nu_0 - f)t - \phi_1 + \varphi] + E_0 J_1(\beta_1) \sin[2\pi(\nu_0 + f)t + \phi_1 + 2\varphi], \quad (3)$$

式中 $\beta_1 = (V_0/V_\pi)\pi/2$ 为第一个 MZM 的相位调制指数(PMI), V_π 是 MZM 的半波电压, J_1 是一阶贝塞尔函数。载波抑制后光波的能量主要集中在两个一阶边带上,经过第一个 MZM 后两个一阶边带的频率分别为 $\nu_0 + f$ 和 $\nu_0 - f$ 。

将第一个 MZM 的输出信号经过适当移相后输入第二个 MZM 中进行处理,此时调制信号电压表

达式为

$$v_2(t) = V_0 \cos(2\pi ft + \phi_2), \quad (4)$$

式中 V_0 和 ϕ_2 分别为输入到第二个 MZM 的 RF 的

电压幅度和初始相位。调节第二个 MZM 的偏置电压, 仍使 MZM 工作在最小传输模式, 其输出光场的电域表达式为

$$E_{\text{out}2}(t) \propto E_0 J_1(\beta_1) J_1(\beta_2) \{ \cos[2\pi(\nu_0 - 2f)t + \varphi - \phi_1 - \phi_2] + \cos(2\pi\nu_0 t + \varphi - \phi_1 + \phi_2) + \cos(2\pi\nu_0 t + 2\varphi + \phi_1 - \phi_2) + \cos[2\pi(\nu_0 + 2f)t + 2\varphi + \phi_1 + \phi_2] \}, \quad (5)$$

$\beta_2 = (V_0/V_\pi)\pi/2$ 是第一个 MZM 的 PMI。

当调制电压和光源的相位差满足 $\varphi + 2\phi_1 - 2\phi_2 = (2k + 1)\pi$ (其中 $k = 0, 1, 2, \dots$) 时, (5) 式可改写为 $E_{\text{out}2}(t) \propto E_0 J_1(\beta_1) J_1(\beta_2) \{ \cos[2\pi(\nu_0 - 2f)t + \varphi - \phi_1 - \phi_2] + \cos[2\pi(\nu_0 + 2f)t + 2\varphi + \phi_1 + \phi_2] \}$, (6)

(6) 式表明从 ECL 光源产生频率为 ν_0 的连续激光, 经过两个工作在最低调制点的 MZM 后, 最终产生的光谱能量主要集中在两个频率分别为 $\nu_0 + 2f$ 和 $\nu_0 - 2f$ 的一阶边带上, 获得四倍频的谐波分量。此信号被掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后注入到 OPLM, 进行后续处理。

对于 OPLM 而言, 它是一个内部放置了高非线性光纤 (HNLF) 的色散非对称萨格纳克环, 如图 2 所示。从原理上看, 频率为 ω_{p1} 的抽运 1 和频率为 ω_{p2} 的抽运 2 (此时对应频率为 $\nu_0 + 2f$ 和 $\nu_0 - 2f$ 的两个边带) 从耦合器 1 端口进入 OPLM, 在环路中, 信号被分为两部分, 一路通过 3 端口沿顺时针方向传播, 另一路光通过 4 端口沿逆时针方向传播。为了更好地说明光场在 OPLM 内部的变化情况, 可将

OPLM 等价于一个马赫-曾德尔干涉仪。OPLM 中沿顺时针方向传播的光路等价于光通过马赫-曾德尔干涉仪的上臂, 沿逆时针方向传播的光路则等价于光通过马赫-曾德尔干涉仪的下臂。沿上臂传播的两路抽运光, 先经过色散介质, 然后在 HNLF 里发生 FWM, 产生两个闲频光, 其频率为 $\omega_{f1} = 2\omega_{p1} - \omega_{p2}$ 和 $\omega_{f2} = 2\omega_{p2} - \omega_{p1}$; 与此同时, 沿下臂传播的两路抽运光, 则是先在 HNLF 里发生 FWM, 然后通过色散介质, 产生两个频率为 $\omega_{f1} = 2\omega_{p1} - \omega_{p2}$ 和 $\omega_{f2} = 2\omega_{p2} - \omega_{p1}$ 的闲频光。沿上臂和下臂传播的抽运源 1 与抽运源 2 在输出端的 1 端口相遇时, 它们的相位差为零, 干涉加强; 然而, 当它们在 2 端口相遇时, 相位差为 π , 干涉相消。这说明, 抽运源 1 和抽运源 2 不能从 2 端口输出。

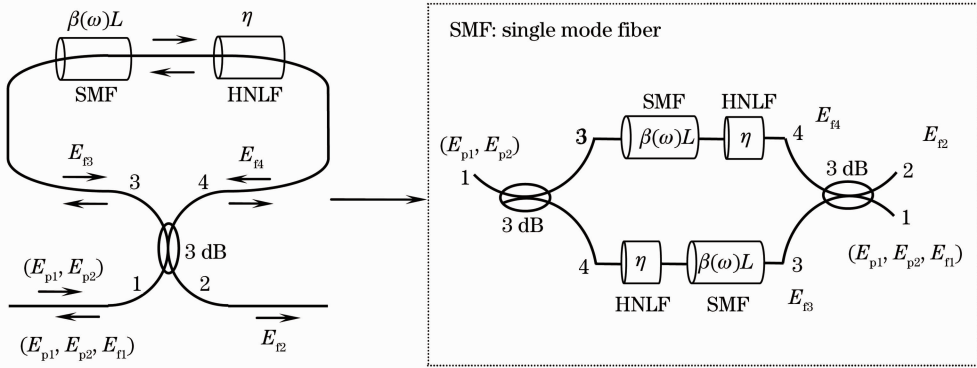


图 2 OPLM 和等价的马赫-曾德尔干涉仪原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of OPLM and Mach-Zehnder interferometer

对于上下两臂 FWM 产生的闲频光输出情况, 也需要分析它们之间的相位关系。以频率 $\omega_{f1} = 2\omega_{p1} - \omega_{p2}$ 的闲频光为例, 其上下两路的电场情况分别用 E_{f3} 和 E_{f4} 表示^[14], 则

$$E_{f3} = -i(\eta/8)^{1/2} E_{p1}^2 E_{p2}^* \exp[-i\beta(\omega_{f1})L], \quad (7)$$

$$E_{f4} = (\eta/8)^{1/2} E_{p1}^2 E_{p2}^* \exp\{-i[2\beta(\omega_{p1}) - \beta(\omega_{p2})]L\}, \quad (8)$$

式中 E_{p1} 和 E_{p2} 分别表示抽运源 1 和抽运源 2 的振

幅。(7) 式中 $\beta(\omega_{f1})L$ 表示沿下臂传播的闲频光 E_{f3} 所产生的相移, (8) 式中 $[2\beta(\omega_{p1}) - \beta(\omega_{p2})]L$ 表示的是沿上臂传播的闲频光 E_{f4} 所产生的相移, 当两个闲频光在输出端的 1 端口或者 2 端口相遇时, 输出功率 P_1 和 P_2 取决于

$$P_1 = \frac{|E_{f3} - iE_{f4}|^2}{2} = P_{\text{FWM}} \frac{1 + \cos \Delta\beta L}{2}, \quad (9)$$

$$P_2 = \frac{|E_{f4} - iE_{f3}|^2}{2} = P_{\text{FWM}} \frac{1 - \cos \Delta\beta L}{2}, \quad (10)$$

式中 $P_{\text{FWM}} = |E_{\text{f3}}|^2 + |E_{\text{f4}}|^2$, $\Delta\beta = 2\beta(\omega_{\text{p1}}) - \beta(\omega_{\text{p2}}) - \beta(\omega_{\text{f1}})$ 。可以看出 P_1 和 P_2 的大小取决于相位延迟量 $\Delta\beta L$ 的大小, 当 $\Delta\beta L$ 的取值等于 $(2n - 1)\pi$, $n = 0, 1, 2, \dots$ 时, $\cos \Delta\beta L = -1$, P_1 的值为零, P_2 的值为 P_{FWM} , 即在上述条件下, 闲频光将只能从 2 端口输出。与此类似, $\omega_{\text{f2}} = 2\omega_{\text{p2}} - \omega_{\text{p1}}$ 的闲频光也将从 2 端口输出, 在 1 端口的输出量为零。

通过上面的分析不难看出, OPLM 可以作为一个频率选择滤波系统, 它将被注入的两个频率分别为 $\nu_0 + 2f$ 和 $\nu_0 - 2f$ 的边带从 1 口返回, 而两个频率为 $\nu_0 + 6f$ 和 $\nu_0 - 6f$ 的谐波分量将会从 2 口输出, 实现基频信号的十二倍频, 产生所需要的光毫米波副载波信号。若基频频率 f 为 5 GHz, 则可以通过该方法直接得到所需要的 60 GHz 光毫米波副载波。此结构对注入光的波长没有要求, 改变色散的大小可以适应不同的基频情况。

3 实验结果及讨论

根据前面的理论分析, 可以设计如图 3 所示的实验系统。实验中, ECL 输出波长为 1559.77 nm 的连续光, 经过一个偏振控制器(PC)调节其偏振态后注入到第一个 MZM 以达到最佳调制效果。光进入到 MZM 后, 被频率为 5 GHz 的正弦微波信号调制, 通过调节偏压使调制器工作在调制曲线的最低点, 最大限度地抑制 OCS 和偶次谐波分量。调制输出光经过可调延时线(TDL)恰当延时和 PC 调节其偏振态后, 被第二个同样工作状态的 MZM 调制, 最终产生两个频率分别为 $\nu_0 + 2f$ 和 $\nu_0 - 2f$ 的边带, 其频率间隔为 $4f$ 。此调制光经过掺铒光纤放大器放大至 15 dBm 后经过一个隔离器(ISO)注入到 OPLM 进

行高次谐波产生和抽运滤波。这里的功率设置是为了产生足够的 FWM 效应同时防止过高的功率产生 SBS, 放置 ISO 是为了防止 OPLM 的反射光反馈进入前端器件。实验中的 OPLM 采用普通单模光纤作为色散介质, 其色散常数为 18 ps/(km·nm)。OPLM 中采用长度为 2 km 的 HNLF 作为非线性介质, 其非线性系数为 $11 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。频率为 $\nu_0 + 2f$ 和 $\nu_0 - 2f$ 的两个边带作为抽运光被注入到 OPLM 在 HNLF 里发生 FWM 效应, 产生两个频率 $\nu_0 + 6f$ 和 $\nu_0 - 6f$ 的闲频光, 其频率间隔为 $12f$ 。实验中采用的基频信号为 5 GHz, 因此所产生的闲频光频率间隔为 60 GHz。FWM 前后的光谱对比如图 4(a) 所示。从图中可以看出, 经过 FWM 以后有明显的闲频光产生, 闲频光和抽运光之间的功率差为 15 dB。为了演示 OPLM 抑制抽运光的效果, 先移除 FBG, 通过调节环内 PC 使抽运光达到最佳抑制效果, 其结果如图 4(b) 所示。从结果可以发现, 闲频光保持不变, 抽运光被抑制了 14 dB, 且噪声基底也得到良好抑制。此时, SMF 所选取的长度为 8.2 km, 与理论预期相符。为了使抽运光进一步被抑制, 可采用 FBG 进行二次滤波。图 4(c) 给出了只使用 FBG 作为滤波器件抑制抽运光前后对比光谱图。从图中, 可以清楚地发现闲频光和噪声基底基本不变而抽运光被抑制了 20 dB。图 4(d) 给出了同时采用 OPLM 和 FBG 进行抽运滤波前后的光谱对比, 从图中可以看出, 由于 FBG 的滤波曲线不平坦, 略微影响了闲频光的强度, 而抽运光被抑制了 35 dB, 同时噪声基底也被抑制。最终, 系统输出光场的闲频光分量要强于原抽运光 16 dB, 实现光毫米波副载波产生。

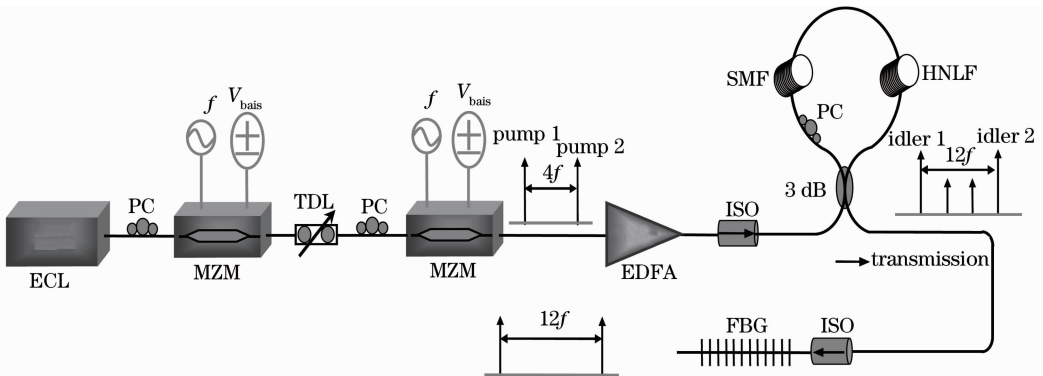


图 3 基于 OPLM 的光毫米波副载波产生的实验原理图

Fig. 3 Experiment schematic diagram of optical millimeter-wave sub-carrier generation based on OPLM

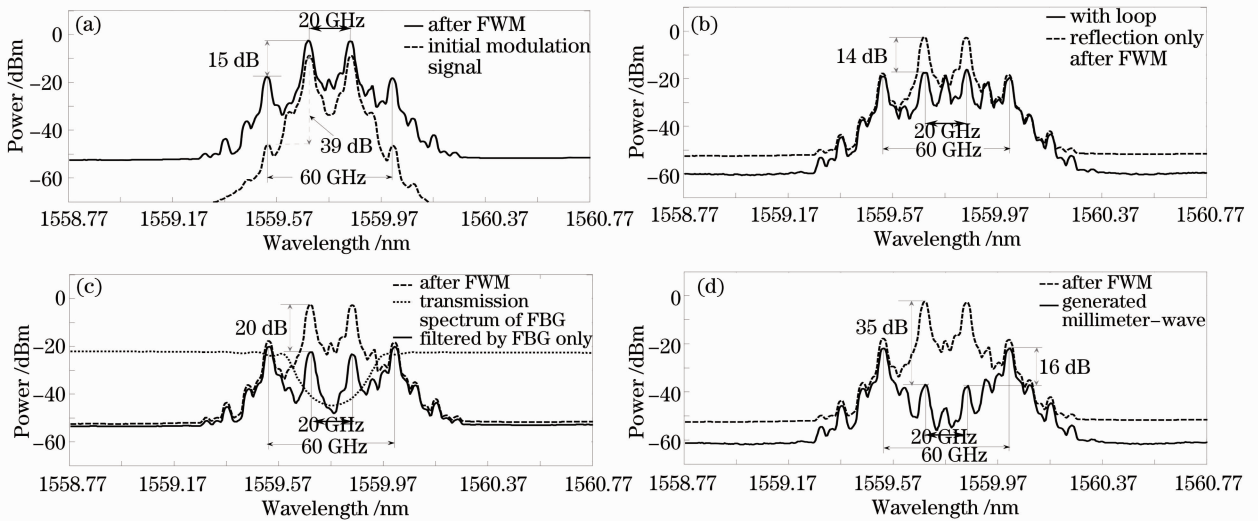


图4 不同条件下的信号光谱图

Fig. 4 Optical spectrum of signal under different conditions

从实验结果中可以看出,该方案结构比较简单,对信号光的波长要求较少,只要恰当地选择色散,可以在不同基频情况下工作,避免了传统方案中对波长和信号带宽的限制。但是,在实验中也发现采用OPLM抑制抽运光的效果并不是很理想,因此采用了一个FBG作为二次滤波器件。通过实验对比和分析,在环长较短的情况下,OPLM可以达到35 dB的抽运抑制。而在实验系统中,为了提供足够的色散和非线性,SMF和HNLF的长度相加达到了10 km以上,这就使得环内顺时针和逆时针传输的两路光场在耦合点的偏振产生较大的波动,影响了干涉的稳定,削弱了抽运抑制效果。因此,若采用更高非线性系数和更大色散系数的光纤替代实验中的选择,则可以极大地减小OPLM的环路长度,在不使用FBG的情况下,也能获得理想的效果。据文献[15]报道,已有色散光纤的色散系数高达 $11200 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$,为SMF的622倍以上,而特殊掺杂的HNLF,其非线性系数也可达到 $1100 \text{ W}^{-1}\text{ km}^{-1}$ 是实验所用HNLF的100倍^[16]。若在这样的条件下,OPLM的环长只需几十米,在不使用FBG抑制抽运光的情况下,也能获得理想的光毫米波副载波输出。

4 结 论

提出了一种基于OPLM和FBG的60 GHz光毫米波副载波产生方案,在理论上详细分析了OPLM的工作原理,并在实验上验证了系统的可行性,获得了良好的效果。该方案的核心在于利用OPLM可以同时实现光子微波信号产生过程中高次谐波产生和抽运滤波两个关键环节,直接获得光

毫米波副载波输出,且便于与光纤系统链接。

参 考 文 献

- 1 K. Xu, X. Sun, J. Yin *et al.*. Enabling ROF technologies and integration architectures for in-building optical-wireless access networks[J]. *Photonics Journal*, 2010, **2**(2): 102~112
- 2 Zhang Dapeng, Yu Chongxiu, Xin Xiangjun *et al.*. Design of up conversion system based on millimeter sub-carrier RoF technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 31~35
张大鹏, 余重秀, 忻向军 等. 光毫米波上变频系统的设计与研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 31~35
- 3 W. Li, H. Ning, L. Wang *et al.*. Tunable carrier generation and broadband data upconversion for RoF systems based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Microwave Theory and Techniques*, 2011, **9**(59): 2350~2356
- 4 M. Li, H. Chen, F. Yin *et al.*. Full-duplex 60-GHz RoF system with optical local oscillating carrier distribution scheme based on FWM effect in SOA[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(22): 1716~1718
- 5 C. Zhang, J. Duan, C. Hong *et al.*. Bidirectional 60-GHz RoF system with multi-Gb/s M-QAM OFDM single-sideband modulation based on injection-locked lasers[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(4): 245~247
- 6 Fan Linyong, Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng *et al.*. Comb-filter based on Mach-Zehnder interferometer using a twin-core fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): s100306
范林勇, 江微微, 赵瑞峰 等. 双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(s1): s100306
- 7 A. Wiberg, P. Pérez-Millán, M. V. Andrés *et al.*. Microwave-photonic frequency multiplication utilizing optical four-wave mixing and fiber Bragg gratings[J]. *Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 329~334
- 8 S. Fu, W. Zhong, P. P. Shum *et al.*. Frequency multiplication of microwave signals by self-induced nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers (SOAs)[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(15): 1081~1083
- 9 Cao Ying, Gu Zhengtian. Optical properties of cascaded long-period and fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 040500
曹莹, 顾铮先. 级联长周期光纤光栅和Bragg光纤光栅的光学特性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(4): 0405003

- 10 Yuan Rong. Arrayed waveguide grating component and its applications [J]. *Optical Communication Technology*, 2010, **34**(1): 1~5
原 荣. 阵列波导光栅(AWG)器件及其应用[J]. 光通信技术, 2010, **34**(1): 1~5
- 11 Zhou Keyu, Ye Hui, Zhen Hongyu *et al.*. Study of tunable Fabry-Perot filter based on piezoelectric polymer film [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(1): 365~369
周可余, 叶 辉, 甄红宇 等. 基于压电聚合物薄膜可调谐 Fabry-Perot 滤波器的研究[J]. 物理学报, 2010, **59**(1): 365~369
- 12 Y. Jiang, J. Yu, B. Han *et al.*. Millimeter-wave subcarrier generation utilizing four-wave mixing and dual-frequency Brillouin pump suppression [J]. *Opt. Engng.*, 2009, **48**(3): 3286~3289
- 13 W. Li, J. Yao. Investigation of photonically assisted microwave frequency multiplication based on external modulation [J]. *Microwave Theory and Techniques*, 2010, **58**(11): 3259~3268
- 14 K. Mori, T. Morioka, M. Saruwatari. Optical parametric loop mirror [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(12): 1424~1426
- 15 T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa *et al.*. Hole-assisted dual concentric core fibre with ultra large negative dispersion coefficient of -11200 ps/nm/km [C]. Opt. Commun. (ECOC), 2010 36th European Conference and Exhibition on, 2010. 1~3
- 16 M. P. Fok, C. Shu. Recent advances in optical processing techniques using highly nonlinear bismuth oxide fiber [J]. *Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, **14**(3): 587~598

栏目编辑: 韩 峰