

基于调制边带法的高次倍频光毫米波产生

曾璐璐, 娄淑琴, 张建明

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 提出了利用外调制技术的调制边带法的六倍频和八倍频光毫米波产生方案。方案仅采用一个马赫曾德尔调制器, 并利用其非线性传输特性, 通过调节 MZM 的偏置电压和调制电压, 控制边带的强度, 仅保留三阶边带或四阶边带, 从而实现六倍频及八倍频光毫米波的产生。采用将基带数据信号仅调制在一个三阶边带或四阶边带分量的方式, 有效防止走离。数值分析结果表明, 提出的方案仅需 10 GHz 及 7.5 GHz 的调制信号频率就能得到 60 GHz 毫米波, 大大减小了调制信号频率, 增加了上变频系数, 传输距离可达 160 km, 而功率代价变化不大。与提出的其他高倍频技术相比, 由于系统仅采用一个马赫曾德尔调制器, 提出的方案系统结构更为简单, 且此方案色散影响较小, 传输距离更长。

关键词: 光毫米波; 调制边带法; 六倍频技术; 八倍频技术

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0401-06

Multiple frequency optical millimeter wave generation based on modulation sideband technique

Zeng Lulu, Lou Shuqin, Zhang Jianming

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A novel scheme was proposed to generate sextupling-frequency and octupling-frequency optical millimeter wave by using external modulator technique. Based on the nonlinear transmission characteristics of one Mach-Zehnder modulator (MZM), the third-order or fourth-order sideband could be enhanced by adjusting the bias voltage and the modulation voltage of MZM, and thus generated successfully sextupling-frequency or octupling-frequency optical millimeter wave. Walk-off effect could be prevented by only modulating the signal on one of the third-order or fourth-order sidebands. Numerical results demonstrate that the proposed scheme generate 60 GHz millimeter wave with only 10 GHz and 7.5 GHz frequency modulated signal, which greatly reduces the frequency of the modulation signal, increases the up-conversion coefficient, and reaches the transmission distance to 160 km without increasing the power penalty distinctly. Compared with other multiple frequency techniques, the proposed system has distinct advantages of simple configuration, low dispersion effect, long transmission distance due to only using one Mach-Zehnder modulator.

Key words: optical millimeter wave; modulation sideband technique; sextupling-frequency technique; octupling-frequency technique

收稿日期: 2014-06-15; 修订日期: 2014-07-20

作者简介: 曾璐璐(1988-), 女, 硕士生, 主要从事 ROF 技术和毫米波产生技术方面的研究。Email: 11120183@bjtu.edu.cn

导师简介: 娄淑琴(1965-), 女, 教授, 博士, 主要从事光纤通信、全光网络关键技术方面的研究。Email: shqlou@bjtu.edu.cn

0 引言

随着通信向宽带化和无线化的发展,ROF 技术已成为未来通信发展的趋势。而光毫米波产生的技术一直是 ROF 技术中的研究热点^[1-14]。采用外部调制法实现二倍频和四倍频技术,产生 40 GHz 和 60GHz 的毫米波^[1-9]是目前受关注的光毫米波产生技术之一。这种技术实现结构简单,在一定程度上可以降低调制信号的频率,但其上变换系数较小。近年来,利用高阶倍频技术的光毫米波的产生方法引起人们的关注,利用并行相位调制器和串联相位调制器等技术实现六倍频和八倍频技术的方案相继提出。利用并行相位调制器实现六倍频技术产生毫米波的方案可以利用 10 GHz 的调制信号产生 60 GHz 的毫米波信号,但传输距离较短,并存在时间走离现象^[9-10]。而利用串联相位调制器实现六倍频技术产生毫米波的方案同样可以实现六倍频和八倍频技术产生毫米波,但六倍频方案的传输距离较短,且携带的基带数据信号速率较低^[11],而八倍频方案中色度色散对信号的影响还需要进一步的研究^[12],而且两类方案存在的一个共同的问题在于它们的系统结构较为复杂,均利用两个调制器来实现,且调制方法为相位调制,因此,在基站中所对应的解调技术较强度调制的解调技术来说也相对复杂一些。另外,还有提出利用布里渊效应实现滤波的六倍频技术,该方法省掉了滤波器器件,但由于受到 PD 带宽的限制使得产生的毫米波信号不能达到 60 GHz,且为实现布里渊效应,所需的功率较高^[13]。由此可见,利用高阶倍频产生毫米波,从系统结构简化、降低调制信号频率、增大传输距离、降低色散等方面尚需进一步深入的研究。

文中提出了利用外调制技术的调制边带法实现六倍频和八倍频产生光毫米波的方案,并利用 FBG 将基带数据信号仅调制在一个三阶边带或四阶边带分量上,有效防止走离。通过理论分析和仿真实验表明,提出的方案仅需 10 GHz 及 7.5 GHz 的调制信号频率就能得到 60 GHz 毫米波,大大减小了调制信号频率,而增加的功率损耗较小,上变频系数也得到增加,系统仅利用一个马赫曾德尔调制器 MZM,结构简单,传输距离可达 160 km。与提出的其他高倍频技术相比,该方案系统结构更为简单,色散影响较小,传输距离较长,系统性能稳定。

1 系统结构及原理

基于调制边带技术的实质是利用马赫曾德尔调制器 MZM 的非线性传输特性产生高次谐波分量。系统的工作原理框图如图 1 所示。激光器发出中心频率为 f_0 、线宽为 δ 的光波,用频率为 f 的调制信号驱动 MZM,通过对 MZM 的双臂电压及偏置电压的选取和设定,得到所需阶的边带 $f_0 \pm nf$,将所得分量分别送入到以 $f_0 + nf$ 和 $f_0 - nf$ 为中心频率的光纤光栅 FBG 中,滤出两边带分量。将所需传输的基带数据信号 $D(t)$ 通过强度调制器(IM)调制到一个边带上,并与另一个未调制边带进行耦合,经光纤放大器 EDFA 放大后,输入到光纤 SMF 中,通过光纤传送到基站中,将所得两分量通过光电检测器 PD 进行拍频,通过带通滤波器 BPF 得到所需的电毫米波。

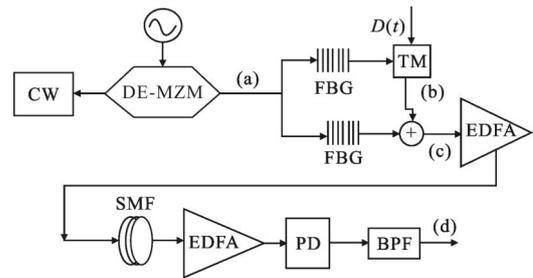


图 1 基于调制边带技术产生毫米波的原理框图

Fig.1 Block diagram of millimeter wave generation based on modulation sideband technique

为了实现六倍频技术,需利用调制边带法的性质来产生两个三阶边带分量,假设入射光的电场表示为 $E_{in}(t) = E_0 \cos(\omega_0 t)$,其中 E_0 为电场幅度, ω_0 为角频率。设定 MZM 上下两臂的直流偏置引起的相位差 $\Delta\varphi = \pi$,上下两臂的相位偏移 $\theta = \pi$,则 MZM 输出端产生抑制偶阶边带的调制,可表示为:

$$E_{in}(t) = E_{in}(t) 2j \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\beta) \cos[(2n-1)\omega_{RF}t] \quad (1)$$

式中: ω_{RF} 为驱动信号的角频率; $J(\beta)$ 为第一类贝塞尔函数,调制深度 $\beta = \pi V_{RF}/V_{\pi}$, V_{RF} 为驱动电压, V_{π} 为半波电压。通过调整驱动电压 V_{RF} 与半波电压 V_{π} 的大小可以控制调制后每阶边带的大小。例如当选取 $\beta = 3.8327$ 时, $J_1(\beta) = -4.003e-04$, $J_3(\beta) = 0.4205$,而 $J_5(\beta) = 0.1133$,即三阶分量最大,一阶分量可以忽略不计,五阶分量的影响也较小。为完全滤除五阶边带

等其他分量对其的干扰,使用 FBG 分别将两个三阶边带滤出,并将数据信号 $D(t)$ 调制在其中一个边带上。在输入到光纤前再将两分量耦合在一起,表达式如公式(2)所示。将耦合后的信号送入到光纤中进行传输。

$$E_{out2}(t)=jE_0J_3(\beta)[\cos(\omega_0t+3\omega_{RF}t)+\cos(\omega_0t-3\omega_{RF}t)D(t)] \quad (2)$$

在基站中,通过 PD 对其进行光电转换,所得到的电信号如公式(3)所示。其中,第一项为直流分量,第二、三、四分量为光频分量,最后一项为六倍频的电毫米波分量,且携带数据信号。

$$I=E_{out2}(E_{out2})^*=J_3^2(\beta)E_0^2[\cos^2(\omega_0t+3\omega_{RF}t)D(t)^2+\cos^2(\omega_0t-3\omega_{RF}t)+2\cos(\omega_0t-3\omega_{RF}t)D(t)\cos(\omega_0t+3\omega_{RF}t)]=$$

$$J_3^2(\beta)E_0^2[\frac{1}{2}(1+D(t)^2)+\frac{1}{2}\cos(2\omega_0t-6\omega_{RF}t)D(t)^2+$$

$$\frac{1}{2}\cos(2\omega_0t+6\omega_{RF}t)+\cos(2\omega_0t)D(t)+\cos(6\omega_{RF}t)D(t)] \quad (3)$$

使用 BPF 滤出所需要的毫米波信号 $J_3^2(\beta)E_0^2 \cdot \cos(6\omega_{RF}t)D(t)$ 。

八倍频技术与六倍频技术原理相似,不同之处在于其 MZM 的参数设置需要调整,以使得产生抑制奇阶边带的调制,通过选取适当的 β 得到四阶边带。利用这种方法的六倍频和八倍频的最明显的优势在于其大大减小了调制信号的频率。在之前的二倍频技术和四倍频技术,产生 60 GHz 所需要的调制信号频率分别为 30 GHz 和 15 GHz,而六倍频技术仅需 10 GHz,八倍频技术仅需 7.5 GHz。另外,在此方案中,光纤中传输的仅有两个分量,这样可以抑制色散对系统的影响。将数据信号仅调制在其中一个光频分量上,还可以防止传统方案中码间干扰和信号走离现象的发生。

2 数值模拟

根据前面的理论分析,对图 1 中的系统进行了数值模拟,激光器产生中心波长为 1 535.4 nm,线宽 δ 为 10 MHz 的光波。六倍频技术中,调制信号的频率 $f=10$ GHz,相位偏移为 π ,半波电压 $V_\pi=4$ V, $V_{bias1}=0$ V, $V_{bias2}=4$ V。此时,偶阶边带分量被抑制。设驱动电压 $V_{RF}=4.88$ V, $\beta=3.8327$,以抑制掉一阶边带,削弱其他分量,仅保留两个频率间隔为 60 GHz 的三阶边带分量,三阶边带分量与一阶边带分量之间的功率差 20 dBm。为尽量避免其他分量由于光纤中的色散对系统的影响,用 FBG 分别滤出两个三阶边带分

量,将速率为 2.5 Gbit/s 的伪随机基带数据信号调制在负三阶边带上,再将两分量用 EDFA 放大并一同传入色散为 17 ps/nm/km,衰减为 0.2 dB/km,长度为 100km 的光纤中。在基站中,将信号放大并送入 PIN 光电检测器中进行光电转换,并用 BPF 滤出 60GHz 毫米波信号。系统框图 1 中各处的频谱图如图 2 所示。

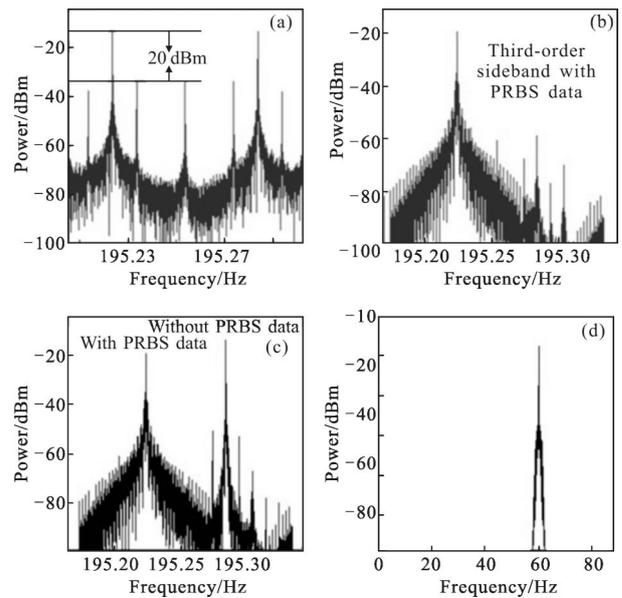
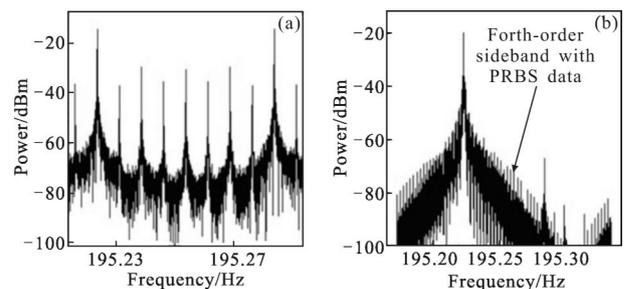


图 2 系统框图 1 中实现六倍频技术时各点的频谱图

Fig.2 Optical frequency spectra at the points (a)-(d) in Fig.1 by sextupling-frequency scheme

八倍频技术与六倍频技术原理及过程相似,参数设置略有不同,其中调制信号频率 $f=7.5$ GHz,相位偏移为 π ,半波电压 $V_\pi=4$ V,直流偏置电压 $V_{bias1}=V_{bias2}=4$ V,得到抑制奇阶边带调制。设定调制电压 $V_{RF}=6.75$ V,调制系数 $\beta=5.3$,此时 $J_0(\beta)=-0.0758$, $J_2(\beta)=-0.0547$, $J_4(\beta)=0.3996$,载波和二阶边带被抑制,并削弱其他分量,仅保留两个频率间隔为 60 GHz 的四阶边带分量,经过光纤到达基站后拍频得到所需毫米波,各处频谱如图 3 所示。



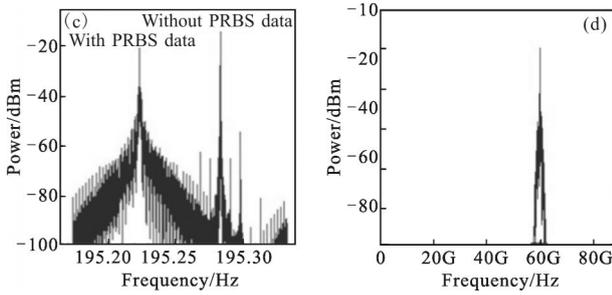


图 3 系统框图 1 中实现八倍频技术时各点的频谱图
Fig.3 Optical frequency spectra at the points (a)–(d) in Fig.1 by octupling-frequency scheme

3 系统性能分析

为验证利用这两种方案的传输距离及其性能优劣,将其与四倍频技术及其他高倍频技术相比较。首先,比较所得毫米波信号的功率,如图 4 所示。六倍频与传统的四倍频技术相比得到的毫米波信号功率相差较小,仅约 0.5 dB 左右,八倍频与传统的四倍频技术相比得到的毫米波信号功率相差也不大,约为 1.4 dB 左右。导致所得毫米波功率相差不大的原因可由如图 5 所示的贝塞尔曲线来说明。在之前理论分析已经给出,所得毫米波信号的大小与贝塞尔函数有关,通常在四倍频技术中取 $\beta=2.405$,因为此处可完全抑制掉载波分量。而在该方案中,六倍频 $\beta=3.8327$,八倍频 $\beta=5.3$,比较图 5 中的曲线可看出其幅值相差不大,即入纤的光频分量功率相差不大,因此,在经过参数相同的光纤后所得毫米波信号的功率差别较小。

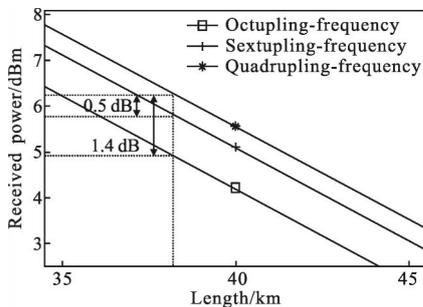


图 4 与四倍频技术相比的功率代价
Fig.4 Power penalty compared with quadrupling-frequency technique

另外,通过仿真得到六倍频技术和八倍频技术的品质因数 Q 及误码率的曲线图,如图 6 所示。可以看出在 160 km 以内随着光纤长度的增加, Q 值较

为稳定,变化幅度较小,在 6.5 左右,这是由于光纤中传输的仅有两个三阶边带分量(或四阶边带分量),且数据信号仅调制在一个边带分量上,削弱了色散及时间走离对系统性能的影响。通过图 6 中的曲线还可以看出,六倍频技术的系统性能与四倍频技术差别很小,不仅 Q 因子值近乎相同,其误码率曲线也几乎相同,在满足误码率小于 10^{-9} 时传输距离均可达 160 km,而八倍频技术性能比四倍频和六倍频稍差些,传输距离略短些,在 100 km 左右。而参考文献[13]的方案中, Q 值稳定在 5 左右,传输距离为 50 km,与之相比,用调制边带法实现的高倍频方案性能更好。

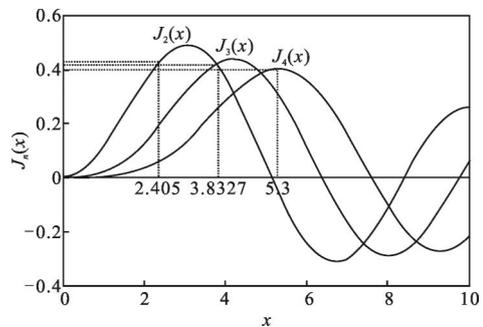


图 5 第二三阶贝塞尔函数数值比较
Fig.5 Bessel function value comparison

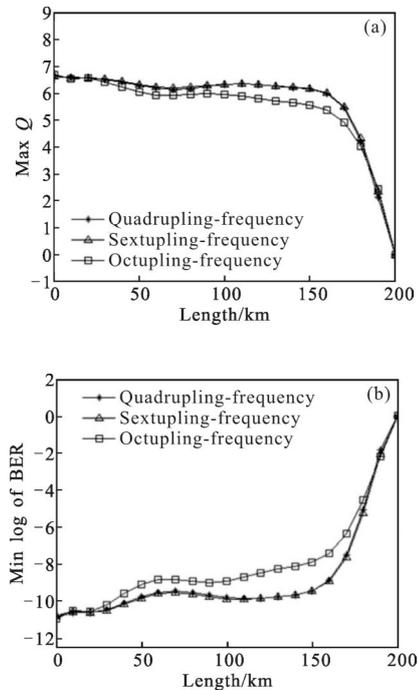


图 6 品质因数 Q 和 BER 曲线
Fig.6 Q -factor and BER curves of three schemes

在该方案的高倍频技术中,光纤中传输的仅有两个分量,在基站中不存在同频不同相的分量迭加,因此色散对系统性能的影响较小。基带数据信号仅调制在一个光频分量上,可以防止时间走离现象。但仍存在色散所致的时延问题,若考虑相位噪声,则入纤前的光频分量为:

$$E_{\text{out}}(t) = J_3(\beta) E_0 [\cos(\omega_0 t - 3\omega_{\text{RF}} t) D(t) + \cos(\omega_0 t + 3\omega_{\text{RF}} t) \exp[j\varphi_1(t)]] \quad (4)$$

式中: $\exp[j\varphi_1(t)]$ 为固定相位项,两分量经过光纤后所产生的时延分别为 τ_1 和 τ_2 。在 PIN 光电检测器中拍频所得的六倍频分量为:

$$J_6 = J_3^2(\beta) E_0^2 \cos(6\omega_{\text{RF}} t) D(t) \cdot E \{ \exp[j\varphi_1(t - \tau_1) - \varphi_2(t - \tau_2)] + \exp(-j)[\varphi_1(t - \tau_1) - \varphi_2(t - \tau_2)] \} = J_3^2(\beta) E_0^2 \cos(6\omega_{\text{RF}} t) \cdot D(t) \cdot 2\exp(-\pi\delta|\tau_2 - \tau_1|) \quad (5)$$

通过公式(5)可以看出色散所致的时延及线宽 δ 对毫米波信号的功率大小有影响。随着传输距离的增加,时延差会越来越大,所得毫米波信号的功率逐渐减小。而线宽 δ 是激光器参数,它与毫米波功率大小的关系如图 7 所示。由图中曲线可以看出,随着线宽 δ 的增加,毫米波功率逐渐下降。即色散所致时延和线宽 δ 共同影响毫米波功率大小。在光纤色散固定的情况下,应尽量选择窄线宽发射源以提高系统性能,延长传输距离。

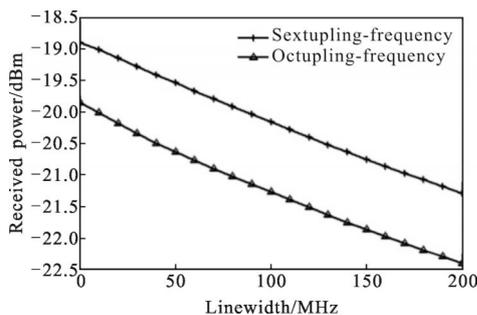


图 7 接收毫米波信号与激光器线宽的关系

Fig.7 The mm-wave power versus the linewidth of the laser

4 结论

文中提出了用基于调制边带法的六倍频和八倍频技术来产生毫米波的方案,分析了其原理并进行了仿真,验证了它的可行性,并与传统四倍频技术及采用其他方法实现高倍频技术的方案进行比较。利用这种方案可以大大减小传统二倍频技术和四倍频

技术中调制信号的频率,仅用 10 GHz 和 7.5 GHz 即可,且调制深度较大,当分别取 VRF 为 4.88 V 和 6.75 V 时,六倍频技术中三阶边带和八倍频技术中四阶边带的调制深度均可达 0.6 左右^[4]。通过对系统性能的分析,还看出毫米波信号的功率与激光器线宽的大小有关,减小线宽可以增大毫米波信号功率,提高系统性能。另外,在该方案中,利用 FBG 确保光纤上仅有两个光频分量传输,仅一个分量携带数据信号,这样可以减少其他分量由于色散的影响所导致的色散所致衰减,也防止了走离的情况发生,可以看出:在 160 km 以内的传输中, Q 值较大且浮动较小,即受色散和走离的影响较小,系统性能相对稳定。

参考文献:

- [1] Zhou G, Zhang X P, Yao J P. A novel photonic frequency down-shifting technique for millimeter-wave-band radio-over-fiber systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(8): 1728-1730.
- [2] Zhu Z H, Zhao S H, Yao Z S, et al. A novel OCS millimeter-wave generation scheme with data carried only by one sideband and wavelength reuse for uplink connection [J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, 44: 2306-2370.
- [3] Yu J, Jia Z, Su Y, et al. Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulator [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(1): 265-267.
- [4] Ma Jianxin, Yu Chongxiu, Zhou Zhen, et al. Optical mm-wave generation by using external modulator based on optical carrier suppression [J]. *Optics Communications*, 2006, 268: 51-57.
- [5] Huang Mingfang, Yu Jianjun, Jia Zhensheng, et al. Simultaneous generation of centralized lightwaves and double/single sideband optical millimeter-wave requiring only low-frequency local oscillator signals for radio-over-fiber system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(15): 2653-2662.
- [6] Zhou Min, Ma Jianxin. The influence of fiber dispersion on the transmission performance of a quadruple-frequency optical millimeter wave with two signal modulation formats [J]. *Optical Switching and Networking*, 2012, 9: 343-350.
- [7] Ngom A. Radio-over-fibre technology for broadband wireless communication systems [R]. Eindhoven: Technische Universiteit, 2005, 23:19-23.
- [8] Yu Jianjun, Jia Zhensheng, Wang Ting, et al. Centralized lightwave radio-over-fiber system with photonic frequency

- quadruple for high-frequency millimeter-wave generation [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(19): 1499–1501.
- [9] Wu Junqin, Yu Yanfang. RoFsystem with 60 GHz optical millimeter-wave generation based on dual parallel PM modulation [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(5): 715–721. (in Chinese)
吴君钦, 余艳芳. 基于双平行 PM 调制的 60 GHz 光毫米波 RoF 系统研究 [J]. 半导体激光, 2012, 33(5): 715–721.
- [10] Hu Shanmei, Chen Lin. Sextupling tunable optical mm-wave OFDM signal generation based on phase modulator [J]. *Acta Photonicasina*, 2010, 39(4): 699–703. (in Chinese)
胡善梅, 陈林. 基于相位调制器产生六倍频光毫米波的 OFDM 信号光传输系统研究 [J]. 光子学报, 2010, 39(4): 699–703.
- [11] Yuan Yan, Qin Yi. Frequency sextupling technique using two cascaded dual-electrode Mach-Zehndermodulators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(10): 1005004–1–5. (in Chinese)
袁燕, 秦毅, 基于串联双电级马赫-曾德尔调制器的六倍频技术[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1005004–1–5.
- [12] Zhu Zihang, Zhao Shanghong, Yao Zhoushi, et al. Analysis of influence of phase shift drift and splitting ratio on octupling-frequency optical millimeterwave generation and distribution[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2112–2118. (in Chinese)
朱子行, 赵尚弘, 玄周石, 等. 相位偏移和分束比对八倍频光毫米波产生及传输的影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2112–2118.
- [13] Wei Zhihu, Wang Rong, Fang Tao, et al. Sextupling tunable mm-wave signal generation based on intensity modulation and Brillouin effect [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(10): 1890–1894. (in Chinese)
魏志虎, 王荣, 方涛, 等. 基于强度调制和布里渊效应的六倍频可调毫米波信号产生[J]. 光电子·激光, 2012, 23(10): 1890–1894.
- [14] Wilson B, Ghassemlooy Z, Darwazeh I, et al. *Analogue Optical Fibre Communications* [M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 1995: 210–212.