

文章编号: 1001-3806(2014)05-0660-05

## 基于偏振调制器的微波光子倍频系统实验研究

李倩<sup>1,2</sup>, 梁亮<sup>1,2</sup>, 郭荣辉<sup>2</sup>

(1. 正德职业技术学院 电子与信息技术系, 南京 211106; 2. 南京航空航天大学 电子信息工程学院, 南京 211100)

**摘要:** 为了证明微波光子倍频系统可以构成光载无线通信系统的一部分, 采用不受光纤色散影响的基于偏振调制器的倍频系数可调的微波光子系统, 理论论证和分析了基于偏振调制器的二倍频、四倍频和六倍频的系统原理和特性。针对于不同的倍频系数, 构建了相应的实验方案, 进行了实验验证、数据分析和实验结果讨论, 在不断进行实验系统优化的基础上实现了良好的倍频输出结果。结果表明, 倍频输出的微波/毫米波信号在仪器测量允许的最大范围内最大可达到42GHz, 且此系统具有受光纤色散影响小的优点。

**关键词:** 光通信; 光载无线传输; 偏振调制器; 相噪; 微波倍频

中图分类号: TN925

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.05.018

## Experimental study about microwave photonic frequency multiplication system based on polarization modulator

LI Qian<sup>1,2</sup>, LIANG Liang<sup>1,2</sup>, GUO Ronghui<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic Information Technology, Zhengde Polytechnic College, Nanjing 211106, China; 2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** In order to prove that the microwave photonic frequency multiplication system can be one part of radio over fiber transmission system, the microwave photonic system based on polarization modulator with the adjustable frequency multiplication factors and without the effect of fiber dispersion was demonstrated. The system principles and characteristics of two, four and six frequency multiplication based on the polarization modulator were analyzed theoretically. The responding different schemes were designed for different frequency multiplication factors. The experimental demonstration, data analysis and experimental result discussion were carried out. The good output of frequency multiplication was achieved on the basis of the ongoing optimization of the experimental system. The results show that the frequency multiplication output of the microwave/millimeter wave signals can be up to 42GHz within the scope of the instrument allowed. The system has the advantage of the small effect of fiber dispersion.

**Key words:** optical communication; radio over fiber transmission; polarization modulator; phase noise; microwave frequency multiplication

### 引言

高质量毫米波的产生是提高光载无线通信 (radio-over-fiber, ROF) 系统性能和降低系统造价的关键技术, 至今已有许多文献中提出了毫米波的产生方案。在所有产生微波/毫米波信号的方法中, 光外调制法<sup>[1-4]</sup> 因其具有系统结构简单、操作稳定且频率可调谐的优点得到了广泛的应用。一些研究机构和

组织也都已经利用光外调制法设计出了各种各样的微波倍频系统, 倍频系数为二倍频、四倍频、六倍频、八倍频、十二倍频不等, 使用的调制器也有强度调制器、偏振调制器和相位调制器等。在这些外调制器当中, 偏振调制器因其偏置电压可调且输入信号幅度可调性, 相对使用比较灵活, 它在不同的驱动功率和偏置下, 可以分别实现抑制载波、抑制偶数阶谐波和抑制奇数阶谐波等<sup>[5]</sup>。作者针对基于偏振调制器和中心波长可调的陷波滤波器构成产生的二倍频、四倍频和六倍频系统进行了详细理论分析、实验验证和性能测试分析。在参考文献[6]中, 提出的一种色散补偿的方法则是使用了一个偏振调制器和

作者简介: 李倩 (1983-), 女, 实验师, 现主要从事光载无线通信系统和数字系统设计的研究。

E-mail: luckyli\_2003@163.com

收稿日期: 2013-09-16; 收到修改稿日期: 2013-10-15

偏振分束器进行实现,其系统构成和本实验系统前部分基本相同,因此,本实验系统也可以说具有不受光纤色散影响的特点。

### 1 倍频系数可调系统的实现原理<sup>[7-8]</sup>

图 1 所示为基于偏振调制器实现微波二倍频、四倍频以及六倍频系统原理图。理论上此系统还可以实现更高系数的倍频,但是由于实验条件限制,在此最高仅做到了六倍频的倍频系数。

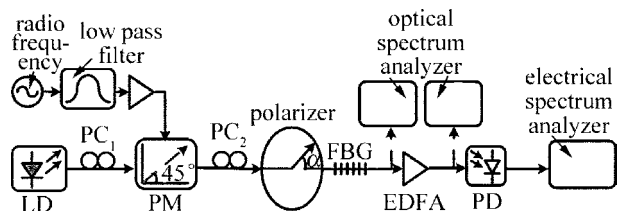


Fig. 1 The diagram of microwave photonic frequency multiplication system based on a polarization modulator

此系统主要是由一个偏振调制器 (polarization modulator, PM) 和一个中心波长可调的陷波滤波器实现。光偏振调制器是一种特殊的相位调制器,它可以同时支持 TE 和 TM 模式进行相位相反的调制。当可调激光器 (laser diode, LD) 产生的入射光以与主轴成 45° 角的方向发送到偏振调制器 PM 时,入射光会分解成为与主轴成一定角度的两束偏振光,而施加在 PM 上的外电压使得这两束偏振光之间产生一定的相位差。光纤布喇格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 作为一种中心波长可调的陷波滤波器可以根据需要将不需要的频谱分量滤除,剩下需要的频谱分量,再经掺铒光纤放大器 (erbium-doped fiber amplifier, EDFA) 放大,最后进入光电探测器 (photo detector, PD) 拍频最终产生所需倍频系数的电信号。此倍频系统之所以可以改变倍频系数的关键在于调整检偏器 (polarization controller, PC) 的偏置角度。四倍频系统通过调节检偏器抑制奇次边带,而六倍频系统则是通过调节检偏器抑制载频和偶次边带。实验过程中发现,微波源的不同频谱分量会对测试结果产生影响,因此,在倍频系统中微波源后也加入了滤波和功率放大模块以消除这种不良影响。

### 2 倍频系数可调系统的理论分析<sup>[7-11]</sup>

当可调激光器连续发射的入射光波与偏振调制器主轴方向成 45° 夹角时,就会受到微波驱动信号的影响,此微波驱动信号的频率为  $\omega_m$ 。而光波在  $x$  轴和  $y$  轴方向上的表达式可表示为:

$$\begin{bmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} e^{j(\omega_0 t + \beta \sin \omega_m t)} \\ e^{j(\omega_0 t - \beta \sin \omega_m t)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,入射光波的角频率是  $\omega_0$ ;偏振调制器的调制指数是  $\beta$ 。

若要得到四倍频系统,只需要将奇次边带滤除,剩下载波和偶次边带。信号表达式根据贝塞尔公式展开:

$$\begin{aligned} E_{o,1}(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} [E_x + E_y] = \\ &= \sqrt{2} \cos(\beta \sin \omega_m t) \cdot \exp(j\omega_0 t) = \\ &= 2 \sqrt{2} \exp(j\omega_0 t) [J_0(\beta) + \\ &+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\beta) \sin(2n\omega_m t)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $J_{2n}(\beta)$  是  $2n$  阶第 1 类贝塞尔函数。此信号再经过陷波滤波器将载波滤除,就只剩下了 2 阶边带的较强信号,其它较弱信号则可忽略。信号表达式可写为:

$$E_o(t) = 2 \sqrt{2} \exp(j\omega_0 t) J_2(\beta) \sin(2\omega_m t) \quad (3)$$

最后经 PD 拍频得到:

$$I(t) \approx -2RJ_2^2(\beta) \sin(4\omega_m t) \quad (4)$$

式中,  $R$  是 PD 的响应度。若要得到六倍频系统,只需要将载波和偶次边带滤除,剩下奇次边带。调整 PC 的角度使得检偏器的输出信号变为:

$$\begin{aligned} E_{o,1}(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} [E_x - E_y] = \\ &= \sqrt{2} j \sin(\beta \sin \omega_m t) \exp(j\omega_0 t) = \\ &= 2 \sqrt{2} \exp(j\omega_0 t + \frac{\pi}{2}) \cdot \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\beta) \sin[(2n-1)\omega_m t] \end{aligned} \quad (5)$$

再经过陷波滤波器将一次谐波滤除,就只剩下了 3 阶边带的较强信号,其它较弱信号亦可忽略。信号表达式可写为:

$$E_o(t) = 2 \sqrt{2} \exp(j\omega_0 t + \frac{\pi}{2}) \cdot J_3(\beta) \sin(3\omega_m t) \quad (6)$$

最后经 PD 拍频得到:

$$I(t) \approx -2RJ_3^2(\beta) \cos(6\omega_m t) \quad (7)$$

二倍频很简单,在此不赘述。

### 3 倍频系数可调系统的实验研究

实验过程中针对不同的倍频系数进行了详细的实验验证和性能测试,以下则为倍频系统重要的两

个指标,系统的相位噪声比和频率可调谐性测试。

### 3.1 不同倍频系数系统的相噪比测试<sup>[12]</sup>

相位噪声是频率域的概念,它是信号时序变化时候的另一种测量方法,结果显示在频域内。实验针对不同系数的倍频系统的相位噪声比均进行了测试,图2和图3所示分别为四倍频和六倍频实验系统的相噪。从图中可以看出,四倍频系统输出信号在10kHz处对应的相位噪声为-76.4dBc/Hz,而六倍频系统的输出信号在10kHz处对应的相位噪声则为-79.82dBc/Hz。

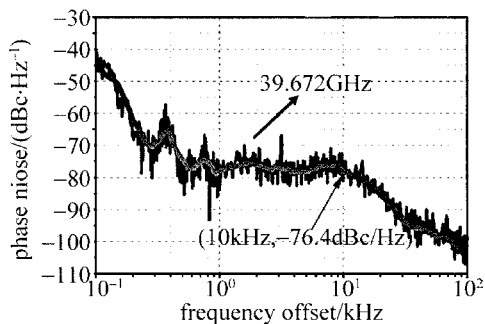


Fig. 2 Phase noise of four-frequency-multiplication system

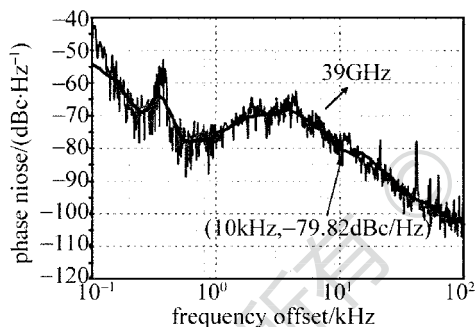


Fig. 3 Phase noise of six-frequency-multiplication system

### 3.2 不同倍频系数系统的频率可调谐性能

为了证明此倍频系统具有频率可调谐性能,实验过程针对不同的倍频系数均进行了系统测试,在此以四倍频系统的测量结果进行举例说明。在进行不同倍频系数的倍频实验时,调整射频信号源输入的微波信号频率,四倍频实验是从8GHz到10.5GHz的频段中选取不同的频率点进行测试,四倍频后产生了32GHz到42GHz的微波/毫米波信号。六倍频实验时,则是在5.33GHz~7GHz的频段中择取不同的频率点进行测试,六倍频后则产生了31.98GHz~42GHz的微波/毫米波信号。图4所示为采集到的不同的频率点对应的PBS后的光谱组合图,其中,图4a为四倍频测试图,图4b为六倍频测试图。图5为不同的频率点对应的PD后的频谱组合图,其中,图5a为四倍

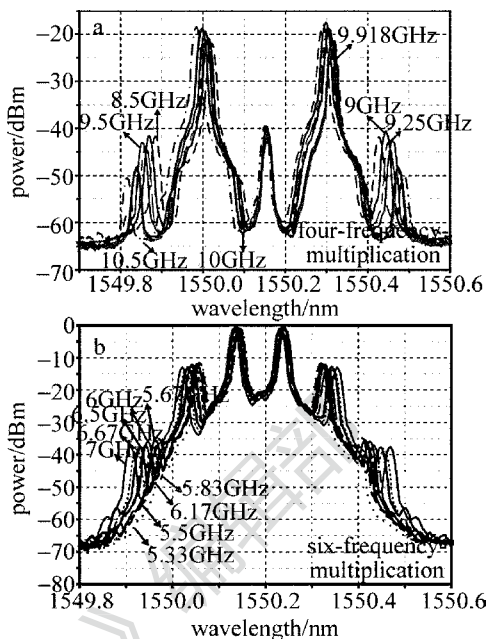


Fig. 4 Spectroscopy after PBS corresponding to different frequency points

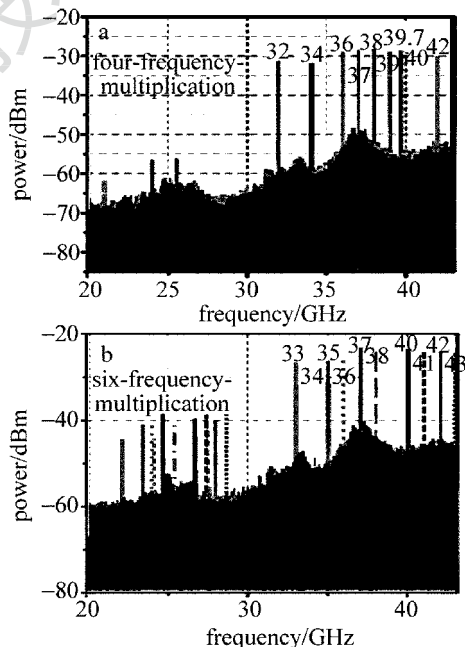


Fig. 5 Spectral diagram after PD corresponding to different frequency points

频测试图,图5b为六倍频测试图。

### 3.3 微波光子倍频系统实验分析与讨论

3.3.1 实验装置的优化 在实验过程中发现,由于实验仪器和装置在使用的过程中会和理论分析的理想状态有很大不同,所以对实验装置进行优化处理也是实验中必不可少的一部分内容。图6所示为6.5GHz频率处信号源射频调整前的频谱图。从图6中的射频信号源优化之前的频谱图可以看出,当

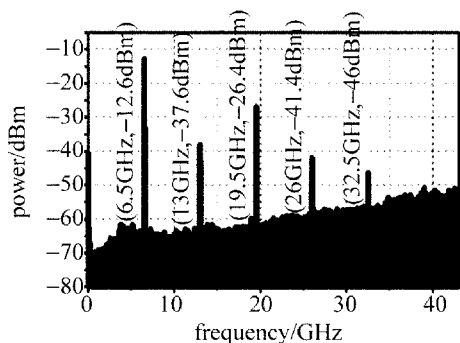


Fig. 6 Spectrum of radio frequency signal at 6.5GHz before the optimization

射频信号源调整到理论 6.5GHz 的输出时,实际的输出信号频率除了 6.5GHz 以外还包含有 13GHz, 19.5GHz, 26GHz 和 32.5GHz 的其它频率分量,其中 6.5GHz 处频谱分量功率最高,而其它频谱信号的功率与 6.5GHz 处功率相差最大为 33.4dBm,最小则只差 13.8dBm。由于多出了很多其它不需要的频谱分量,使得倍频后的输出信号变得复杂。为了得到相对单纯的频率信号,系统在射频信号源后面增加了低通滤波器(lower pass filter, LPF)和微波功率放大器,图 1 显示的则是射频微波源优化后的系统线路图。其中,LPF 可将不需要的频谱分量滤除只留下需要的频率,而微波功率放大器则可将输出的频率信号的功率进行放大,以便更好的驱动偏振调制器进行工作。这种微波源的优化方式使得输出的频率符合系统设计的要求,优化后的频谱如图 7 所示。对比图 6 可以看出,当调整倍频系统中微波输入信号为 6.5GHz 时,经过优化处理之后的射频信号源的输出也只剩下了系统所需的 6.5GHz 的频谱分量而已,这也使得倍频系统输出的频谱更加单纯可靠。

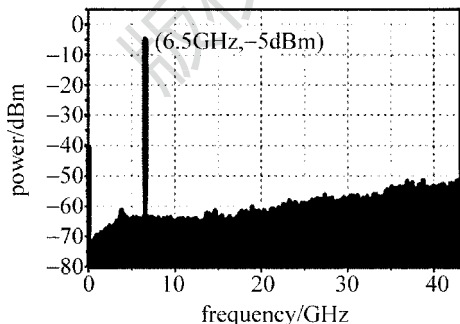


Fig. 7 Spectrum of radio frequency signal at 6.5GHz after the optimization

3.3.2 FBG 的深度测试研究 由于 FBG 深度不够,实验测试了不同 FBG 的透射谱以及它们级联之后的透射谱,选择了一种相对合适的 FBG 级联方式。现有的中心波长合适的 FBG 有 3 个,分别编号

为 FBG-A, FBG-B, FBG-C, 图 8 所示为对其分别进行测试的结果。显然, FBG-A 的透射谱最深,然而实际操作中只用 FBG-A 显然不够,因此这里把 FBG-A 分别与 FBG-B 和 FBG-C 组合使用,选择最佳结构。图 9 所示则为 3 个 FBG 组合与其中两个

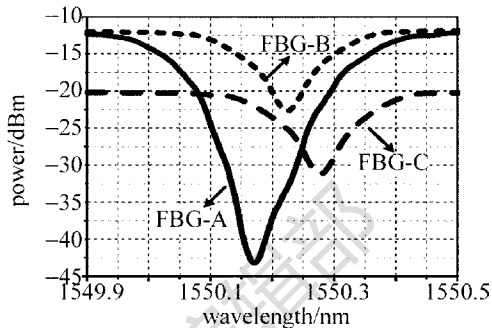


Fig. 8 FBG spectra

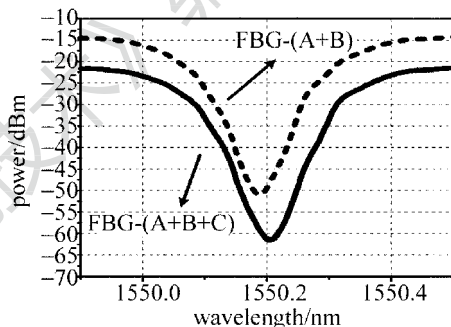


Fig. 9 FBG spectra under different combination modes

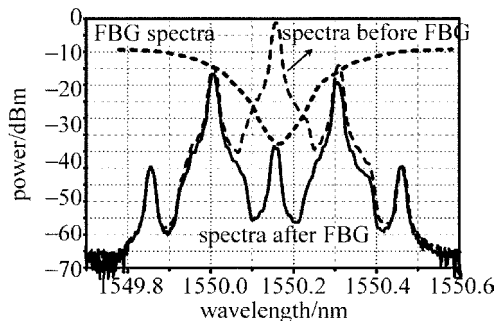


Fig. 10 Spectra of the four-frequency-multiplication system before and after FBG

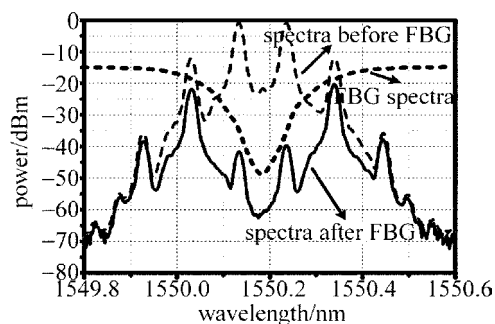


Fig. 11 Spectra of the six-frequency-multiplication system before and after FBG

组合使用的透射谱对比图,虽然滤波的绝对深度最深,但是相对深度与其它两种组合透射谱深度相差并不是很大,因此,实际使用中 3 个组合的方式并不比两种组合方式效果更好。为了节约成本,实验中选用了两个 FBG 组合的方式进行。

在倍频实验的研究过程中,倍频系数为 4 时系统调整载频信号为 9.5GHz,图 10 所示为四倍频系统中 FBG 透射谱对光谱图的影响。而倍频系数为 6 时则调整载频信号为 6.5GHz,图 11 所示为六倍频系统中 FBG 透射谱对光谱图的影响。

#### 4 结 论

微波/毫米波的产生是 ROF 系统中的关键技术之一,产生微波/毫米波的方法也是多种多样的。针对基于 PM 的不同倍频系数的倍频系统进行了详细的实验验证过程,得到了一个低成本的倍频系数可调的倍频系统。由于频谱测试仪所能测量的最大频率为 43GHz,所使用的光电探测器带宽也为 43GHz,因此,实验中能测得输出的微波/毫米波频率不大于 43GHz,而理论上此系统能够得到的微波/毫米波频率还可以更高。本系统的优点在于它的传输信号不受到光纤色散的影响<sup>[6]</sup>,而其缺点则是由于系统选用的 FBG 中心波长容易受到外界环境因素的影响,其性能也会因外界环境因素发生变化,因此,若想将此系统真正投入使用还需进行更进一步的优化。

#### 参 考 文 献

- [1] O' REILLY J J, LANE P M, HEIDEMANN R, *et al.* Optical generation of very narrow linewidth millimeterwave signals [J]. IET Electronics Letters, 1992, 28(25): 2309-2311.
- [2] O' REILLY J J, LANE P M. Fiber-supported optical generation and delivery of 60GHz signals [J]. IET Electronics Letters, 1994, 30(16): 1329-1330.
- [3] LI W Z, YAO J P. Investigation of photonic assisted microwave frequency multiplication based on external modulation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(11): 3259-3268.
- [4] ZHU D, PAN S L, BEN D. Tunable frequency-quadrupling dual-loop optoelectronic oscillator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(3): 194-196.
- [5] HUANG H. Researches of radio-over-fibersystem based on microwave photonics technologies application [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication, 2009: 13-22 (in Chinese).
- [6] ZHANG H, PAN S L, HUANG M H, *et al.* Polarization-modulated analog photonic link with compensation of the dispersion-induced power fading [J]. Optics Letters, 2012, 37(5): 866-868.
- [7] PAN S L, YA J P. Tunable subterahertz wave generation based on photonic frequency sextupling using a polarization modulator and a wavelength-fixed notch filter [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(7): 1967-1974.
- [8] ZHANG J G. Study on the characteristics of ultra-short optical pulse propagation based on short-time Fourier transformation [J]. Laser Technology, 2013, 37(1): 52-55 (in Chinese).
- [9] GOLDBERG L, TAYLOR H F, WELLER J F, *et al.* Microwave signal generation with injection locked laser diodes [J]. IET Electronics Letters, 1983, 19(13): 491-493.
- [10] ZHANG Y M. Investigation of optical generation of frequency tunable and multiplied microwave signal [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012: 9-30 (in Chinese).
- [11] LI Q. Frequency doubling technology research based on MZM [J]. Science & Technology Information, 2013(9): 317-317 (in Chinese).
- [12] JIA Ch J. Research and implementation of optical fiber transmission system for low phase noise signal [J]. Optical Communication Technology, 2007(2): 62-63 (in Chinese).