

文章编号: 0253-2239(2006)10-1464-5

# 一种基于光纤光栅的毫米波副载波光纤通信方案

叶 青 刘 峰 瞿荣辉 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

**摘要:** 提出了一种采用光纤光栅滤波器获得具有一定间隔双波长成分的光脉冲光谱实现毫米波副载波光信号产生的方法。利用逆工程算法,设计了一种变迹叠栅(Moiré)光纤光栅滤波器,给出了相应的模拟结果;并在实验上初步制作了相应的光纤光栅滤波器,验证其可行性。同时基于所设计的光纤光栅和波分复用技术,提出了一种频移键控光纤-无线通信系统 Radio Over Fiber 系统,为下一代的高速大容量的光纤-无线通信系统提供一种可行的备选解决方案。

**关键词:** 光纤光学; 毫米波副载波光纤通信; 变迹叠栅光纤光栅滤波器; 频移键控 ROF 方案

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## Fiber-Communication Project of Millimeter-Wave Subcarrier Based on Fiber Grating

Ye Qing Liu Feng Qu Ronghui Fang Zujie

(Laboratory of Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** A method is proposed to realize millimeter-wave subcarrier optical signal generation by using a double-wavelength optical spectrum of a certain distance with fiber grating filter. The feasibility is analyzed by designing an apodized moiré fiber grating in which Fourier transformation reverse-engineering method is used, the simulation result is also presented, and the related fiber grating filter is fabricated experimentally. Moreover, based on the designed fiber grating and the technology of wavelength division multiplexing, a frequency shift keying radio-over-fiber communication system is suggested, and the proposed scheme may be taken as one of the candidates for the next generation high-speed and large-capability radio-over-fiber system.

**Key words:** fiber optics; millimeter-wave subcarrier fiber communication; apodized moiré fiber grating filter; frequency shift keying radio-over-fiber scheme

## 1 引 言

当今信息社会对包括声音、数据和图像等多媒体通信的需求将越来越迫切,人们希望能在任何时候向个人(无论这个人在什么地方)提供这些通信业务,所以宽带移动通信吸引了人们极大的研究兴趣。移动通信经历了第一代和第二代,完成了从模拟技术向数字技术的转变,现正在向第三代(3G)过渡;研发的重点转向带宽更大的第四代技术。开发利用

频率更高的无线电波段,即毫米波频段,成为研究的一个热点<sup>[1,2]</sup>。但是,与厘米波段的微波相比,毫米波的传输距离短,障碍物的绕射能力弱,系统需要设置更多的基站。基站与基站之间、基站与中心局之间的信息传输就必须依赖于具有大容量特性的光纤通信技术。因此,在光纤上传送毫米波副载波信号,即 Radio Over Fiber 或 Radio On Fiber (ROF),被认为是一个最理想的解决方案。在 ROF 通信系统

作者简介: 叶 青(1977~),男,湖北鄂州人,博士研究生,主要从事光纤通信系统中光纤光栅的色散补偿及其器件的研究。E-mail: yeqing@mail.siom.ac.cn

导师简介: 方祖捷(1942~),男,浙江宁波人,中国科学院上海光学精密机械研究所研究员,博士生导师,主要从事光通信系统与技术、半导体器件技术的研究。E-mail: zjfang@mail.siom.ac.cn

收稿日期: 2006-02-16; 收到修改稿日期: 2006-04-04

中,由于基站数量巨大,沿用原有的高速收发端机和技术,成本太高,经济上缺乏可行性。同时,由于较高的调制频率,光纤色散问题必须同时考虑和解决。因此,简单可靠、低成本的毫米波副载波光发射机是一个首先需要解决的关键问题。

近年来,毫米波副载波发生器的研究工作已经有不少报道,提出了多种的技术方案。由于高的副载波频率,激光二极管很难实现在毫米波频段的直接调制,通常采用的解决方法主要包括外部光学调制器<sup>[3,4]</sup>、中频副载波的传输和在基站实现频率的上转换<sup>[5]</sup>、光外差拍频技术<sup>[6,7]</sup>等等;也有报道利用高双折射光纤的色散和非线性特性实现偏振干涉效应来产生毫米波调制光脉冲<sup>[8]</sup>。本文提出了一种利用无源光学滤波器实现光脉冲包络高速调制的方案,从而产生毫米波副载波频率调制的光学信号。

## 2 基于光纤光栅滤波器的毫米波光载波发生器

本文提出的基本思想是利用一个具有双峰值波长的光纤光栅滤波器,将入射的单一峰值、光滑包络的光脉冲,转换为一个以毫米波频率调制的光脉冲。输入脉冲可以用一个高斯型脉冲作为典型例子,如(1)式所示。希望输出光脉冲具有如(2)式所示的波形:

$$E_{in} = E_0 \exp(-2t^2/\tau_0^2) \exp(i\omega_0 t), \quad (1)$$

$$E_{out} = E_1 \exp(-2t^2/\tau_1^2) \exp(i\omega_0 t) \cos(\pi f t), \quad (2)$$

式中  $\tau_0$  和  $\tau_1$  为输入和输出脉冲光强的  $1/e$  全宽,  $f$  为所要求的毫米波频率,  $\omega_0$  为脉冲的中心频率,  $E_0$  和  $E_1$  分别为输入脉冲和输出脉冲的振幅。光纤光栅作为一种无源器件,它对输入光脉冲的作用可以用其频谱函数(即反射系数函数)  $H_{FBG}(\omega)$  来描述:

$$H_{FBG}(\omega) = \frac{\tilde{E}_{out}(\omega)}{\tilde{E}_{in}(\omega)} = \frac{E_1 \tau_1}{E_0 \tau_0} \exp\left(\frac{-\pi^2 f^2 \tau_1^2}{8}\right) \times \exp\left[\frac{-(\omega - \omega_0)^2 (\tau_1^2 - \tau_0^2)}{8}\right] \times \cosh\left[\frac{\pi f (\omega - \omega_0) \tau_1^2}{4}\right], \quad (3)$$

式中  $\tilde{E}_{in}(\omega)$ ,  $\tilde{E}_{out}(\omega)$  为相应的输入和输出光脉冲的频谱,它可以通过对(1)式和(2)式进行傅里叶变换获得。(3)式是一个被双曲余弦函数修正的高斯型光谱,它描述了所要求的传输函数是一个具有双峰值波长的光纤光栅的反射谱线,如图1所示。显然,输出光脉冲的脉宽必须大于输入脉冲的脉宽,(3)式才具有收敛的特性,这是一个基本的要求。也

就是说,输入脉冲的频谱宽度必须足够大,以致它被光纤光栅的频谱修正后,能够产生两个对应于毫米波频率的峰值间隔。

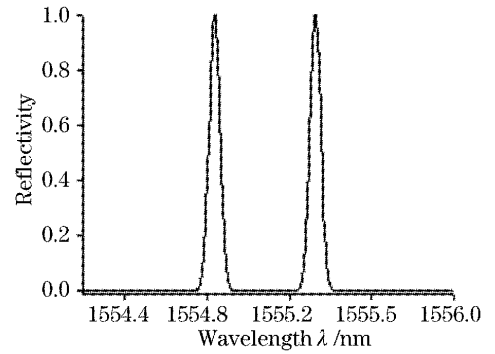


图1 光纤光栅的目标传递函数

Fig. 1 Target transfer function of fiber grating

由(3)式可以得到两个峰值波长的位置分别为

$$\omega_{\pm} \approx \omega_0 \pm \pi f \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\pi^2 f^2 \tau_1^2}{2}\right) + \frac{\tau_0^2}{\tau_1^2} \right] \approx \omega_0 \pm \pi f. \quad (4)$$

这表明,经过光纤光栅反射后,一个光脉冲将包含有两个间隔对应于毫米波的频率分量。这两个分量具有相同的相位,它们之间必然会发生拍频,使光脉冲在时域上的幅度被相应的频率所调制。

光纤光栅作为一种无源器件,其反射谱峰值的最大值只能小于或等于1。当取光纤光栅的峰值极限反射率为1时,由(3)式可以得到输出脉冲与输入脉冲幅度的比值为

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{2\tau_0}{\tau_1} \exp\left(\frac{-\pi^{1/2} f^2 \tau_0^2}{8}\right) \left[ 1 + \exp\left(\frac{-\pi^2 f^2 \tau_1^2}{2}\right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

相应的输出脉冲与输入脉冲能量之比为:

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} \approx \frac{2\tau_0}{\tau_1} \exp\left(\frac{-\pi^{1/2} f^2 \tau_0^2}{4}\right) \left[ 1 + \exp\left(\frac{-\pi^2 f^2 \tau_1^2}{4}\right) \right], \quad (6)$$

(5)式和(6)式反映了双峰值光纤光栅的反射引起光脉冲能量的损失。这是使用无源器件带来的代价,是能量守恒的必然要求。由(6)式可知,从能量利用效率的角度,对于一定的毫米波频率,它存在着一个最佳的输入光脉冲宽度:  $|\tau_0|_{max} = \sqrt{2}/(\pi f)$ 。

由(3)式还可以得到光强反射谱的两个反射峰的  $1/e$  全宽,为

$$\delta\omega = \frac{2 \sqrt{\pi^2 f^2 \tau_0^4 + 4(\tau_1^2 - \tau_0^2)}}{\tau_1^2 - \tau_0^2}, \quad (7)$$

这也是设计和制作双峰值光纤光栅的一个重要参量,它决定了输出脉冲包络的宽度。

以上的分析都是基于理想高斯型光学脉冲的情

况,对于实际的其它类型光学信号需要加以修正。如果利用线性啁啾的输入光脉冲,由于其原始线宽较大,这有利于产生拍频所要求的频率分量。

### 3 变迹叠栅光纤光栅的设计和分析

从以上的分析可知,所要求的滤波器是一个具有双峰结构的滤波器,双峰间频率差正好等于所要求的毫米波副载波的频率。叠栅(Moiré)光纤光栅正是一个具有双峰反射谱的滤波器<sup>[9,10]</sup>。它是通过在同一光纤区域写入两个不同周期的布拉格光栅来实现的,具有制备方法简便,工艺稳定的优点。但是,常规设计和制作的叠栅光纤光栅,其谱函数与上述所要求的高斯型函数有一定的差距,底部还往往有一些边模。目前,利用光纤光栅的变迹(切趾)技术<sup>[10,11]</sup>和逆工程设计<sup>[12,13]</sup>的结合,可以较好地解决叠栅光纤光栅的边模问题,从而达到光纤光栅的反射谱线和目标传递函数的匹配。下面根据毫米波副载波产生的要求,给出一个具体的利用变迹叠栅光纤光栅来实现毫米波副载波光学信号的产生的设计例子。

假设要求的毫米波频率为 60 GHz,波长为 5 mm。根据上述最大能量转换效率的要求,选择输入光脉冲宽度为 7.5 ps。输出光脉冲的宽度要根据数据传输速率来考虑,假设其宽度为 100 ps。光纤链路中使用的波段为 1550 nm。根据均匀光纤光栅谱宽与光栅长度  $L$  和光栅耦合系数  $\kappa$  的关系:

$$\delta\lambda \propto \lambda \sqrt{\kappa^2/\pi^2 + 1/L^2}, \quad (8)$$

以及(7)式关于反射峰宽度的要求,设计光纤光栅长度在 30 mm 左右,光纤光栅折射率调制幅度为  $\Delta n = 3 \times 10^{-4}$ 。为了修正均匀光纤光栅的边峰,并尽量适合(3)式所要求的谱函数形式,要对均匀光纤光栅作变迹修正。根据以往工作的经验<sup>[10,11]</sup>,选取如下升余弦形式的变迹函数:

$$F(z) = \frac{\cos(2z/L - 1) + b}{1 + b}, \quad (9)$$

在这些基本参量条件下,可以采用逆工程设计程序对所需要的变迹光纤光栅进行具体的设计。经过迭代计算后,所设计的光纤光栅的具体参量为:制作叠栅条纹的紫外激光辐照采用的相位板的周期  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  分别为 536.93 nm, 537.10 nm; 变迹参量  $b = -0.5$ ; 光栅长度  $L = 33.1$  mm; 沿光纤光栅的长度形成 19 个叠栅条纹的暗区,如图 2 所示。反射峰间隔为 0.48 nm, 每一个峰的线宽为 0.0512 nm (40.17 GHz)。模拟计算结果如图 3 所示,表明光纤光栅的反射谱线基本上满足设计的目标要求。

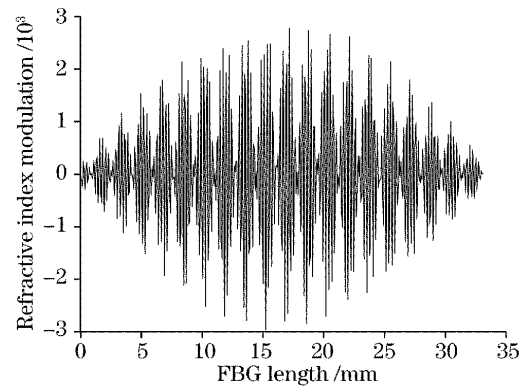


图 2 变迹叠栅光纤光栅的折射率调制

Fig. 2 Refractive index modulation of the apodized moiré fiber grating

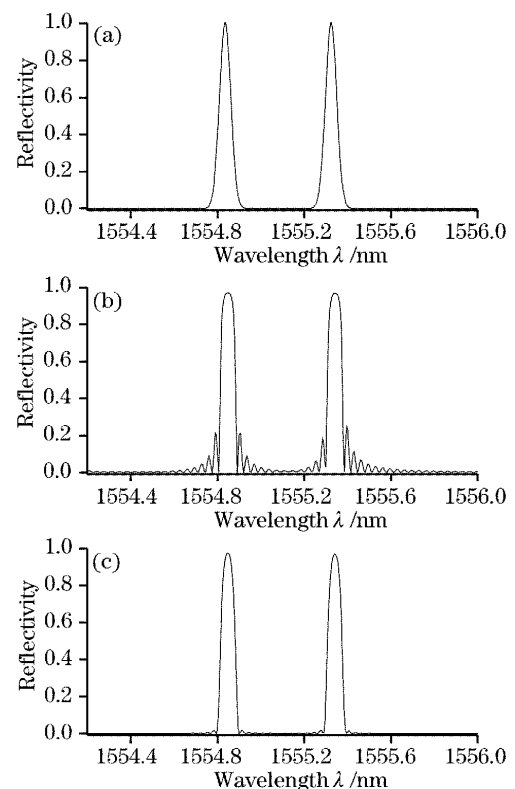


图 3 光纤光栅的传输函数。(a)目标传输函数,(b)未经变迹的叠栅光纤光栅传输函数,(c)变迹的叠栅光纤光栅传输函数

Fig. 3 Transfer function of fiber grating. The target function (a), transfer functions without apodized moiré fiber grating (b) and with apodized moiré fiber grating (c)

图 4 显示了一个初始脉冲宽度为 7.5 ps 高斯脉冲经过上述设计的变迹叠栅光纤光栅的反射波形和所要求目标脉冲波形的对比。从图 4 可以看出,从光纤光栅输出脉冲的波形和所要求的目标波形基本上一致,仍然保持高斯脉冲的包络,其幅度被一个毫米波波段的频率(60 GHz)调制,实现了将一个高斯脉冲转换为毫米波频率调制的光学脉冲。

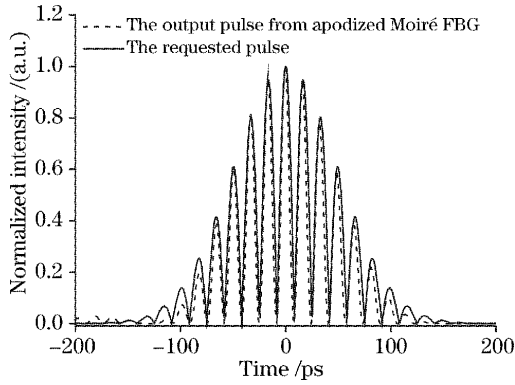


图 4 变迹叠栅光纤光栅输出波形和目标脉冲波形  
Fig. 4 Output pulse and target pulse profiles for the apodized moiré fiber grating

图 5 为根据上述原理制备的变迹叠栅光纤光栅滤波器的透射谱线,可以看到,实现了双波长的滤波特性,波长间隔约为 0.5 nm,响应的拍频毫米波频率约为 60 GHz。产生毫米波的实验研究工作正在

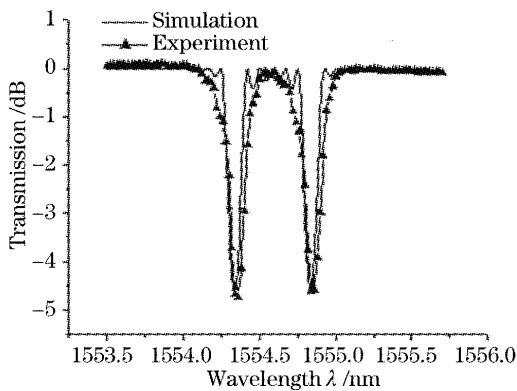


图 5 变迹叠栅光纤光栅透射谱线实验与理论的对比  
Fig. 5 Transmission spectra comparison for apodized moiré fiber grating in experiment and theory

进行之中。

#### 4 频移键控毫米波副载波通信的方案设计

以上提出了一个基于变迹叠栅光纤光栅的毫米波副载波调制的光脉冲发生器,可以实现毫米波的幅度键控(Amplitude shift keying, ASK)通信方式。基于同一原理,并利用光纤通信的波分复用特点,还可以发展不同的调制方式。这儿提出一种频移键控的 ROF 通信方式,其原理如图 6 所示。图 6(a)为 ROF 通信系统的发射端机。二进制电信号从线路的左端输入,以图中(1001)为例表示。数据信号分成两路,一路直接驱动一激光电源,使激光器发射波长为  $\lambda_1$  的光脉冲;另一路经过倒相器,使高低电平互换,如图中波形(0110),驱动另一路激光电源,使激光器发射波长为  $\lambda_2$  的光脉冲。两激光器产生的光脉冲经尾纤分别输出到合波器,从一条光纤中输出。输出光波为一个等幅度、等脉宽的脉冲串;但是光波长却随着输入电信号的高低电平变化而变化,如图中输出信号所示。图 6(b)为系统的接收端机。经光纤线路传送过来的光信号,经波分复用器后,两波长光脉冲分别进入上下两路;分别经脉冲压缩器压缩,通过环形器进入各自的双峰值光纤光栅。两光纤光栅均为本文设计的变迹叠栅光纤光栅,中心波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ,而相应的毫米波副载波的调制频率分别为  $f_1$  和  $f_2$ 。两路光脉冲信号经光纤光栅反射后,转换为两束频率为  $f_1$  和  $f_2$  的毫米波调制的光波,在合波器上合并,从一根光纤上输出。输出

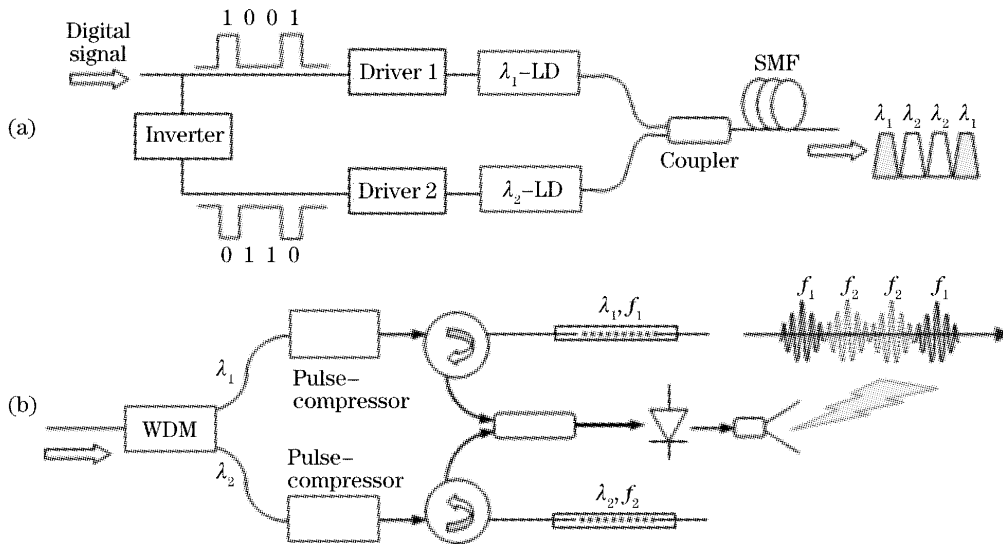


图 6 频移键控(FSK)制式的 ROF 系统发射器(a),ROF 系统接收器(b)

Fig. 6 Radio-over-fiber transmitter (a) radio-over-fiber receiver (b) in frequency shift keying

光波在高速光电探测器上检波,转换为相应毫米波频率的电磁波;经过电路放大,从毫米波的发射天线发射出去,被用户手机或另一基站所接收。这一发射的毫米波为一频率调制的毫米波脉冲,毫米波频率  $f_1$  代表原始二进制数据信号的 1;毫米波频率  $f_2$  代表原始信号的 0。在手机或其它的移动终端接收到这一频移键控的毫米波后,经过外差检波解调后就可以得到原始发出的二进制电信号。

## 5 结论和讨论

本文提出的基于变迹叠栅光纤光栅的毫米波副载波光通信技术,以及频移键控的 ROF 系统方案,具有以下潜在的潜在优点:1)利用光信号两种波长成分的拍频,产生毫米波副载波信号,只需采用一个无源的叠栅光纤光栅就可以实现,工作稳定可靠。2)利用光纤传输的波分复用原理,采用成熟的器件,可实现毫米波的频移键控,方法简单易行。3)光栅制作工艺稳定、成熟,价格低廉,易于推广应用。4)相关器件体积小、重量轻,与光纤兼容,连接方便。

但是,该方法在具体实施中,还有一些基本的问题需要作以下考虑和说明:

1)光脉冲压缩问题。本文的思想是采用无源滤波器修正光信号光谱,获得两种波长成分。这就要求输入的光信号有足够宽的光谱线宽。在满足傅里叶变换的理想情况下,也就是要求输入的光脉冲的脉宽足够窄。因此需要在进入滤波器之前进行脉冲压缩,如图 6(b)所示。在激光技术中光脉冲的压缩已有较多的报道,其中包括采用光纤光栅相关的器件来实现脉冲压缩的方法<sup>[14]</sup>。在本方案中可以利用相关的原理,根据毫米波拍频的要求设计和实施。

2)能量效率问题 由第 2 节的分析可知,采用无源滤波器修正信号光谱,必然造成光脉冲幅度的下降。虽然在 ROF 系统中一般光纤传输距离不长,光功率不是一个关键因素,但是如果滤波后功率损失太多,还是会影响信号的质量,因此需要采用适当的光学放大。掺铒光纤放大器(EDFA)从技术上和经济上已相当成熟,可以满足系统中功率放大的要求。

3)初始啁啾问题 本文的理论分析都是在假设傅里叶变换的理想条件下讨论的。实际光信号的光谱质量不是那么理想,不可避免地存在啁啾或其他缺陷。然而,超短激光脉冲的啁啾脉冲放大(CPA)技术,正是利用了啁啾的特性。啁啾对拍频效应的影响需要做仔细的理论分析,有关研究结果将另文发表。

总之,本文对采用无源滤波器实现毫米波副载

波光信号产生的方法进行了基本的理论分析;用逆工程算法设计了一种变迹叠栅光纤光栅,模拟了这一方法的可行性;提出了一种基于光纤光栅和波分复用技术的频移键控 ROF 系统的方案。为下一代的高速大容量的 ROF 系统提供了一种可行的备选解决方案。

## 参 考 文 献

- 1 H. Harada, K. Sato, M. Fujise. A radio-on-fiber based millimeter-wave road-vehicle communication system by a code division multiplexing radio transmission scheme [J]. *IEEE Trans. Intelligent Transport Sys.*, 2001, **2**(4): 165~179
- 2 H. Al-Rawashidy, S. Komaki. *Radio Over Fiber Technologies for Mobile Communications Networks* [M]. Norwood: Artech House, 2002. 20~37
- 3 H. Schmuck. Comparison of optical millimetre-wave system concepts with regard to chromatic dispersion [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(21): 1848~1849
- 4 G. H. Smith, D. Novak, Z. Ahmed. Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 1997, **45**(8): 1410~1415
- 5 L. Smoczynski, M. Marciniak. A comparison of different radio over fiber system concepts with regard to applications in mobile internet and multimedia[C]. *ICTON*, 2002, **Tu. P. 8**: 211~213
- 6 U. Gliese, S. Nøskov, T. N. Nielsen. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave an millimeter-wave links[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 1996, **44**(10): 1716~1724
- 7 R. Hofstetter, H. Schmuck, R. Heidemann. Dispersion effects in optical millimeter-wave systems using self-heterodyne method for transport and generation [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 1995, **43**(9): 2263~2269
- 8 Oren Levinson, M. Horowitz. Generation of complex microwave and millimeter-wave pulses using dispersion and Kerr effect in optical fiber systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(5): 1179~1187
- 9 Zhao Ling, Li Lin, Luo Aiping *et al.*. Bandwidth controllable transmission filter based on Moiré fiber Bragg grating[J]. *Optik*, 2002, **113**(12): 464~468
- 10 Zhao Ling, Qu Ronghui, Li Lin *et al.*. Apodization of fiber Bragg grating based on Moiré effect[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1103~1106 (in Chinese)
- 赵 岭, 瞿荣辉, 李 琳 等. 基于莫尔效应的光纤光栅变迹的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12): 1103~1106
- 11 Qu Ronghui, Ding Hao, Zhao Hao *et al.*. Effects of grating substructures on the spectral characteristics of fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(5): 567~572 (in Chinese)
- 瞿荣辉, 丁 浩, 赵 浩 等. 光栅子结构对光纤光栅特性的影响[J]. *光学学报*, 1998, **18**(5): 567~572
- 12 Huang Rui, Luo Aiping, Qu Ronghui *et al.*. Fiber Bragg grating for generation of picosecond doubled optical pulses [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(12): 1405~1409 (in Chinese)
- 黄 锐, 罗爱平, 瞿荣辉 等. 用于产生 ps 量级双脉冲的光纤光栅[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(12): 1405~1409
- 13 Huang Rui, Chen Gang, Dong Zuoren *et al.*. Synthesis and fabrication of fiber Bragg gratings with triangular and broad-bandwidth reflection spectrum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 179~182 (in Chinese)
- 黄 锐, 陈 刚, 董作人 等. 三角形大带宽反射光谱的光纤光栅的逆工程设计和制备[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 179~182
- 14 G. Lenz, B. J. Eggleton, N. Litchinitser. Pulse compression using fiber gratings as highly dispersive nonlinear elements[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(2): 715~721