

基于长周期光纤光栅载边比连续可调的单边带调制光载无线通信系统

油海东^{1,2} 宁提纲^{1*} 李 晶¹ 简 伟¹ 温晓东¹ 陈宏尧¹

(¹ 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044
² 青岛农业大学理学与信息学院, 山东 青岛 266109)

摘要 提出了一种基于长周期光纤光栅(LPFG)载边比(CSR)连续可调的单边带调制光载无线通信(RoF)系统。其核心单元是由偏振控制器(PC)、偏振分束器(PBS)、两个平行的长周期光纤光栅和偏振合束器(PBC)构成的载边比调节单元。通过调节偏振控制器输出的偏振角度,就可以实现载边比的连续可调。进一步分析了调制指数、长周期光纤光栅透射率峰值和马赫-曾德尔调制器消光比对载边比的影响。仿真结果与理论分析结果具有很好的一致性。经 40 km 标准单模光纤(SMF)传输后的仿真实验表明,当载边比由 13.22 dB 调节到 5.4 dB 后,系统灵敏度提高了 5.7 dB。

关键词 光纤光学;光载无线通信;载边比调节;单边带调制;长周期光纤光栅

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706008

Optical Single Sideband Modulation Radio over Fiber System with Tunable Carrier-to-Sideband Ratio Based on Long Period Fiber Gratings

You Haidong^{1,2} Ning Tigang¹ Li Jing¹ Jian Wei¹ Wen Xiaodong¹ Chen Hongyao¹

(¹ Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
² Science and Information College, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China)

Abstract An optical single sideband modulation radio over fiber (RoF) system with tunable carrier-to-sideband ratio (CSR) based on long period fiber grating (LPFG) is presented. The system mainly consists of five polarization controllers (PC), a polarization beam splitter (PBS), two parallelized long period fiber gratings (LPFG), and a polarization beam combiner (PBC). By tuning the polarization controller placed in front of the polarization beam splitter, continuously tunable carrier-to-sideband ratio can be obtained. The impacts of modulation index, transmission peak value of LPFG, and extinction ratio of the Mach-Zehnder modulator on CSR are discussed. Simulated results for transmission over 40-km single mode fiber (SMF) show that the receiving sensitivity increases by 5.7 dB when CSR changes from 13.22 dB to 5.4 dB which matches well with theoretical analysis.

Key words fiber optics; radio over fiber; tunable carrier-to-sideband ratio; single sideband modulation; long period fiber gratings

OCIS codes 060.2310; 060.2330; 060.2360; 060.4080

1 引 言

光载无线通信(RoF)^[1-2]是光纤通信和无线通信相结合的一种通信方式。一个典型的 RoF 系统由中心站(CS)、基站(BS)和光纤链路组成^[3]。在

RoF 系统中,常用的调制方式是光双边带(ODSB)调制。由于光纤链路中色散的影响,会导致光检测器(PD)输出的电信号功率随光纤长度产生周期性振荡衰落^[4],在每条光纤链路中设置一个色散补偿单元,

收稿日期: 2013-01-11; 收到修改稿日期: 2013-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(61177069,61275092)

作者简介: 油海东(1979—),男,博士,讲师,主要从事光纤无线通信、超宽带信号产生、光学微分器等方面的研究。

E-mail: 11111006@bjtu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: tgning@bjtu.edu.cn

会造成整个系统结构复杂,成本急剧上升。

采用光单边带(OSSB)调制^[5-6],可以有效消除这种周期性振荡衰落。把载波功率和边带功率之比定义为载边比(CSR, R_{CS})。研究表明,在 OSSB 调制方式当中,当 $R_{CS}=0$ dB 时,能够显著改善光纤链路性能^[7]。目前为止,人们提出了各种方案对 CSR 进行优化,如采用重复写入光栅技术^[8]、三角形谱啁啾光栅技术^[9]等。文献[10]通过优化调制指数,来获取最优的 CSR。但这些方案的共同缺点是 CSR 不能调节,一旦系统状态发生改变,CSR 就会增大,使链路性能恶化。文献[11]通过调节双平行马赫-曾德尔调制器(MZM)的偏置电压实现 CSR 的连续调节,但该方案需要对两个偏置电压同时进行精细调节,操作困难。文献[12]提出了一种基于保偏光纤光栅的 CSR 连续可调的方案,但由于保偏光纤光栅制作困难、价格相对较高,而且保偏光纤工作特性受光纤非圆对称性、应力和环境温度等的影响很大,容易导致 CSR 波动变化较大。本文提出了一种利用常规长周期光纤光栅(LPFG)对 CSR 进行连续调节的方案,并从理论分析和仿真实验两个方面对光载无线通信进行了分析。

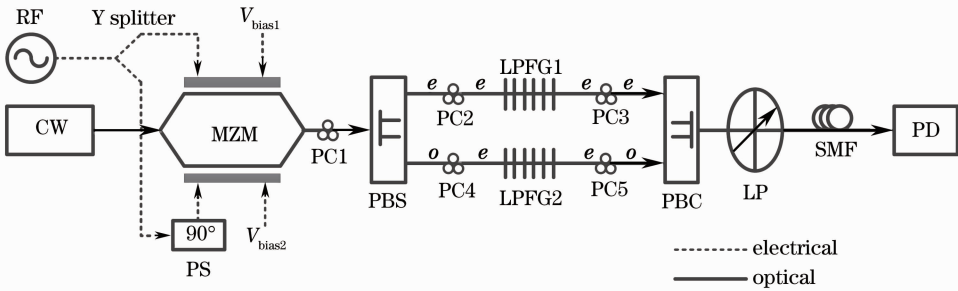


图 1 CSR 可调的光单边带调制系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed optical single sideband modulation system with tunable CSR

假设 e 为 LPFG 的主轴方向, o 为其垂直方向, 偏振控制器 1(PC1) 输出线偏振光的方向与 e 方向的夹角为 ϕ 。LPFG1 和 LPFG2 的谐振波长分别为 λ_1, λ_2 , 且 $\lambda_1 > \lambda_2$, 谐振波长差 $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ 。如果 CW 激光器的输出波长为 λ_2 , RF 信号的频率 $f_s =$

2 理论分析

基于长周期光纤光栅 CSR 连续可调的单边带调制光载无线通信系统结构图如图 1 所示。假设射频(RF)信号的表达式为 $V_s \cos(\omega_s t)$, V_s 为振幅, ω_s 为角频率。RF 信号经 Y 型分束器分为两路, 一路输入 MZM 的上臂, 一路经一个 90° 移相器(PS)后输入 MZM 的下臂。MZM 的上下臂偏压分别为 $V_{bias1}=0, V_{bias2}=V_\pi/2, V_\pi$ 为半波电压。当调制指数 $m=2^{-1/2} \pi V_s/V_\pi$ 足够小时, MZM 的输出光场可以近似表示为^[13]

$$E_{MZM}(t) \approx \frac{E_0}{\sqrt{L_1}} [a_0 \exp(i\omega_0 t) + a_{-1} \exp(i\omega_0 t - i\omega_s t)], \quad (1)$$

式中 L_1 为 MZM 的插入损耗, E_0 为连续波(CW)激光器输出光的振幅, ω_0 为其角频率。 $a_0 = [i\gamma + (1 - \gamma)]J_0(m)$, $a_{-1} = -iJ_1(m)$, $J_n(\cdot)$ 表示 n 阶贝塞尔函数, m 为调制指数, $\gamma = 1 - 1/10^{R_{EX}/20}$, R_{EX} 为 MZM 的消光比。从(1)式可以看出, MZM 输出的 OSSB 调制信号只存在载波和 -1 阶边带。

(c/λ_2^2) $\Delta\lambda$, c 为光速, 那么 MZM 输出的 OSSB 调制信号的载波与 λ_2 对准, -1 阶边带与 λ_1 对准。LPFG 透射率峰值为 α , 与中心波长间隔 $\Delta\lambda$ 处的透射率为 β 。从偏振分束器(PBS)上端口输出的光信号, 透过 LPFG1 后的光场可以表示为

$$E_{LPFG1}(t) = e \frac{E_0 \cos \phi}{\sqrt{L_1}} [Ba_0 \exp(i\omega_0 t) + Aa_{-1} \exp(i\omega_0 t - i\omega_s t)], \quad (2)$$

式中 $A = 10^{\alpha/20}$, $B = 10^{\beta/20}$, 分别表示 LPFG1 对 -1 阶边带和载波的衰减量。同理, LPFG2 输出的光场表达式为

$$E_{LPFG2}(t) = o \frac{E_0 \sin \phi}{\sqrt{L_1}} [Aa_0 \exp(i\omega_0 t) + Ba_{-1} \exp(i\omega_0 t - i\omega_s t)]. \quad (3)$$

LPFG1 和 LPFG2 输出的光场由偏振合束器(PBC)组合成一路光信号, 线偏振器(LP)输出光的偏振方

向与 e 的夹角为 45° 。最后经标准单模光纤(SMF)后由 PD 检测。LP 的输出光场可以表示为

$$E_{LP} = \frac{E_0}{\sqrt{2}L_1} [(B\cos\phi + A\sin\phi)a_0 \exp(i\omega_0 t) + (A\cos\phi + B\sin\phi)a_{-1} \exp(i\omega_0 t - i\omega_s t)]. \quad (4)$$

由(4)式可以知道,LP 输出的 OSSB 调制信号的 R_{CS} 为

$$R_{CS} = 10\lg[(1 + 10R_{EX}/10) \frac{J_0^2(m)}{2J_1^2(m)} \left| \frac{B\cos\phi + A\sin\phi}{A\cos\phi + B\sin\phi} \right|^2]. \quad (5)$$

从(5)式可以看出,LP 输出 OSSB 调制信号的载边比 R_{CS} 与消光比 R_{EX} 、调制指数 m 和透射率 α 、 β 有关。如果 MZM 和 LPFG 选定之后,那么 R_{CS} 就唯一由 ϕ 决定,因此调整 ϕ ,就可以实现 R_{CS} 的连续调节。

(5) 式中设定如下参数: $R_{EX} = 25$ dB, $\alpha = -28.8143$ dB, $\beta = -18.0744$ dB。当调制指数 m 分别取 0.6, 0.8, 1.0 时, R_{CS} 随 ϕ 的变化关系曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出, R_{CS} 随 ϕ 连续变化, 调节范围大约在 20 dB 左右, 当取不同的调制指数 m 时, R_{CS} 均可被调节到 0 dB。当 $m=0.8$ 时, $R_{CS}=0$ dB 时所对应的 ϕ 为 68.4° 。

图 3、4 分别为透射率 α 与消光比 R_{EX} 对 R_{CS} 的

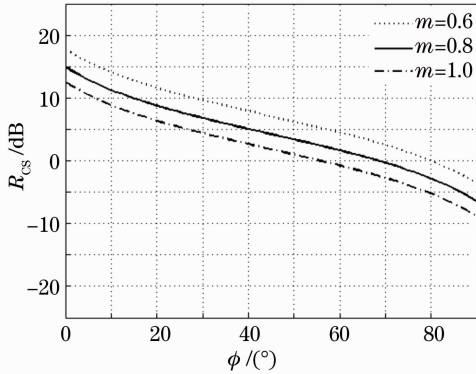


图 2 R_{CS} 随 ϕ 的变化关系曲线

Fig. 2 Curves of R_{CS} versus ϕ

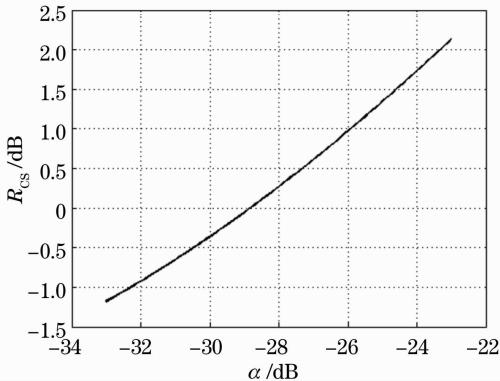


图 3 R_{CS} 随 α 的变化关系曲线

Fig. 3 Curve of R_{CS} versus α

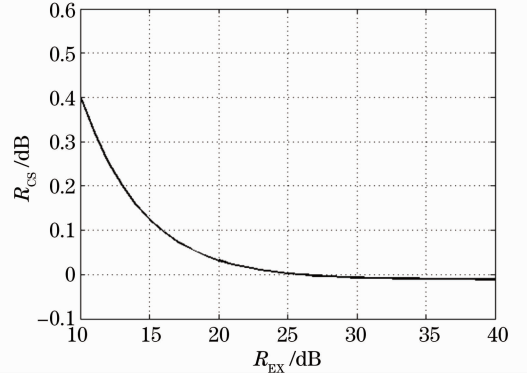


图 4 R_{CS} 随 R_{EX} 的变化关系曲线

Fig. 4 Curve of R_{CS} versus R_{EX}

影响($m=0.8, \phi=68.4^\circ$)。从图 3 和图 4 可以看出, R_{CS} 与 α 呈近似线性关系, 而 R_{CS} 与 R_{EX} 为非线性关系。当 $R_{EX} > 25$ dB 时, R_{CS} 几乎不再受 R_{EX} 的影响。因此, 本文中, 设定 R_{EX} 为 25 dB, 此时 R_{EX} 对 R_{CS} 的调节性能几乎没有影响。

3 仿真实验

为了验证理论分析的正确性, 本文使用 OptiSystem 10.0 对上述系统进行了仿真实验。首先仿真了 LPFG1 和 LPFG2 的透射谱。LPFG1 的纤芯直径、包层直径和第三层直径分别为 4, 15, 58, 35, 20 μm , 折射率分别为 1.44921, 1.44403, 1.00000, 调制指数为 0.000225, 周期为 630.4 μm , 周期数为 100。LPFG2 的周期为 630 μm , 其余参数和 LPFG1 相

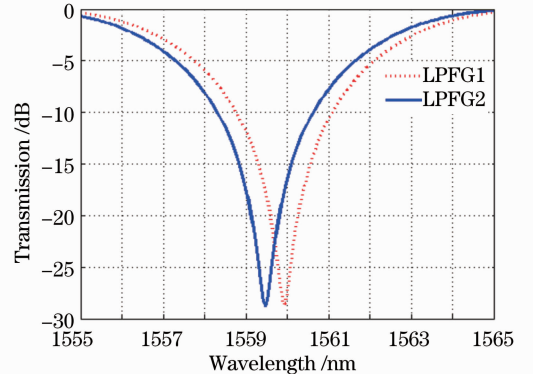


图 5 LPFG1 和 LPFG2 的透射谱

Fig. 5 Transmission spectra of LPFG1 and LPFG2

同。仿真所得的 LPFG1 和 LPFG2 的透射谱如图 5 所示。由图 5 可以看出, LPFG1 和 LPFG2 除谐振波长不同之外, 其透射谱几乎相同。LPFG1 的谐振波长为 1559.9 nm, LPFG2 的谐振波长为 1559.5 nm, 谐振波长差 $\Delta\lambda = 0.4$ nm, 透射率峰值均为 $\alpha = -28.8143$ dB, 与中心波长间隔 $\Delta\lambda$ 处的透射率均为 $\beta = -18.0744$ dB。

使用 OptiSystem 10.0 构建了基于图 1 的仿真实验系统, 设定 CW 激光器的输出光波长为 1559.5 nm (与 LPFG2 的谐振波长对准), 输出功率为 10 dBm。MZM 半波电压 $V_\pi = 4$ V, $R_{EX} = 25$ dB, 设置偏压 $V_{bias1} = 0$ 、 $V_{bias2} = 2$ V。RF 信号的频率 $f_s = 49.32$ GHz, 振幅 $V_s = 1.4405$ V, 相应的调制指数 $m = 0.8$ 。图 6 为 MZM 输出的 OSSB 调制信号光谱。由图 6 可以看出, 载波位于 1559.5 nm 波长处, -1 阶边带位于 1559.9 nm 波长处, $R_{CS} = 4.12$ dB。调节 PC1, 连续改变 ϕ , 就可以调节 LP 输出的 OSSB 调制信号的 R_{CS} 。

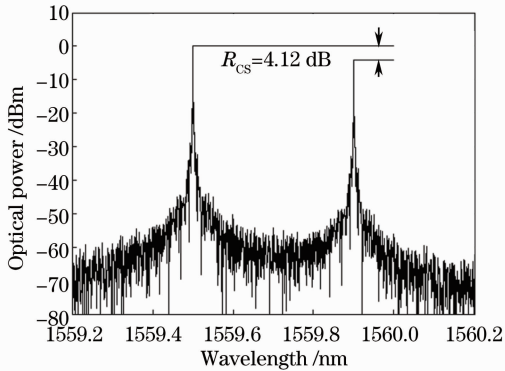


图 6 MZM 输出的 OSSB 调制信号光谱
Fig. 6 Optical spectrum after OSSB modulation signal output from MZM

图 7 给出了 R_{CS} 随 ϕ 的理论计算和仿真曲线, 其中实线表示理论计算结果, 方框点表示仿真结果。图 7 中插入的 4 个图分别表示 $\phi = 10^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ 时, LP 输出的 OSSB 调制信号的光谱。从图 7 可以看出, 理论计算结果和仿真结果具有很好的一致性。

图 8 为仿真实验测得的误码率 (BER, R_{BE}) 随接收光功率的变化曲线。1 Gb/s 的伪随机码信号通过强度调制器调制到 OSSB 光波上。接收光功率为 -27 dBm 时所对应的眼图也插入在图 8 中。当 $R_{CS} = 13.22$ dB 时, 经 40 km SMF 传输相比于经背靠背 (BTB) 传输, 光的误码率急剧增加; 而当 $R_{CS} = 5.4$ dB 时, 经 40 km SMF 传输后的误码率与经 BTB 传输后的误码率相当, 这说明当 R_{CS} 降低时, 能

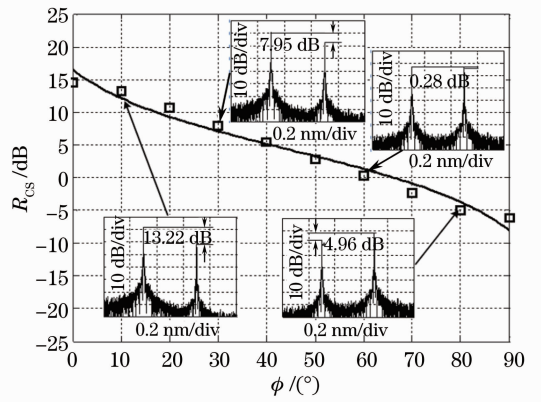


图 7 R_{CS} 随 ϕ 变化的理论计算曲线 (实线) 和仿真曲线 (方框点)
Fig. 7 Calculated (lines) and simulation (marks) curves of R_{CS} versus ϕ

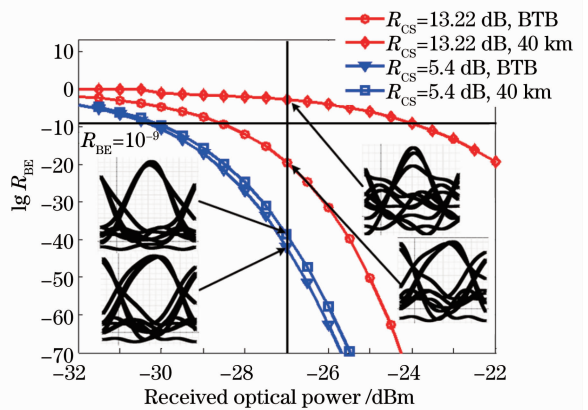


图 8 误码率随接收光功率的变化曲线

够显著改善系统误码性能。通过图 8 中插入的眼图也可以看出, $R_{CS} = 5.4$ dB 的眼图张开度比 $R_{CS} = 13.22$ dB 所对应的眼图张开度要大。当 $R_{BE} = 10^{-9}$ 时, 传输 40 km SMF 后, $R_{CS} = 13.22$ dB 和 $R_{CS} = 5.4$ dB 所对应的灵敏度分别为 -24.1 dBm 和 -29.8 dBm, 可见当 R_{CS} 从 13.22 dB 调节到 5.4 dB 后, 系统灵敏度提高了 5.7 dB。

4 结 论

从理论和实验两方面分析了一种基于长周期光纤光栅 CSR 连续可调的单边带调制光载无线通信系统, 仅通过调节一个偏振控制器, 就可以实现 CSR 的连续调节。仿真实验表明, 降低 CSR, 能够有效改善系统性能。如果采用动态偏振控制器, 并引入反馈机制, 使 CSR 维持在 0 dB, 这样系统性能便始终处于最优状态。由于本系统采用长周期光纤光栅, 因此整个系统成本低廉、结构简单, 受环境因

素影响相对较小,为高速大容量的 RoF 系统提供了一种经济实用的备选方案。

参 考 文 献

- 1 Jiang Tao, Huang Dexiu, Zhang Xinliang, *et al.*. A full-duplex 60 GHz-band radio over fiber system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(1): 36–42.
江涛, 黄德修, 张新亮, 等. 全双工 60 GHz 的光纤无线通信系统[J]. *光学学报*, 2008, 28(1): 36–42.
- 2 Wang Wenrui, Yu Jinlong, Wu Bo, *et al.*. Novel radio over fiber frequency up-conversion in millimeter wave band [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 0305005.
王文睿, 于晋龙, 吴波, 等. 新型无本振毫米波光纤无线通信上变频系统[J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0305005.
- 3 Zhu Zihang, Zhao Shanghong, Yao Zhoushi, *et al.*. Generation of frequency quadruple optical millimeter-wave signal to overcome chromatic dispersion [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 39(4): 0405004.
朱子行, 赵尚弘, 么周石, 等. 一种克服色度色散影响的四倍频光毫米波信号产生方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0405004.
- 4 Gliese U, Norskov S, Nielsen T N. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links [J]. *IEEE Trans Microwave Theory & Tech*, 1996, 44(10): 1716–1724.
- 5 Cao Z Z, Yu J J, Chen L, *et al.*. Reversely modulated optical single sideband scheme and its application in a 60-GHz full duplex RoF system [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(10): 827–829.
- 6 Chow C W, Yeh C H, Lo S M, *et al.*. Long-reach radio-over-fiber signal distribution using single-sideband signal generated by a silicon-modulator [J]. *Opt Express*, 2011, 19(12): 11312–11317.
- 7 Lim C, Attygalle M, Nirmalathas A, *et al.*. Analysis of optical carrier-to-sideband ratio for improving transmission performance in fiber-radio links [J]. *IEEE Trans Microwave Theory & Tech*, 2006, 54(5): 2181–2187.
- 8 Ning T G, Li J, Pei L, *et al.*. Overwritten fiber Bragg grating and its application in an optical single sideband with carrier modulation radio over a fiber system [J]. *Opt Engng*, 2011, 50(3): 035001.
- 9 Li Jing, Ning Tigang, Pei Li, *et al.*. Fabrication of triangular chirped fiber Bragg grating and its application in single-sideband modulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(5): 054203.
李晶, 宁提纲, 裴丽, 等. 三角形啁啾谱光纤光栅的制备及其在光纤无线单边带调制系统中的应用[J]. *物理学报*, 2011, 60(5): 054203.
- 10 Zhao Jiangong, Liu Zengji, Liu Xiangling, *et al.*. Optimum modulation index for single sideband radio over fiber system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, (7): 1960–1964.
赵建功, 刘增基, 刘香玲, 等. 单边带光纤承载射频系统的最佳调制指数[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 1960–1964.
- 11 Hraimel B, Zhang X, Pei Y, *et al.*. Optical single-sideband modulation with tunable optical carrier to sideband ratio in radio over fiber systems [J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(5): 775–781.
- 12 Li J, Ning T, Pei L, *et al.*. Performance analysis of an optical single sideband modulation approach with tunable optical carrier-to-sideband ratio [J]. *Opt & Laser Technol*, 2013, 48: 210–215.
- 13 Wu Shuqiang, Pei Li, Ning Tigang, *et al.*. Radio over fiber downlink system based on a new double-uniform fiber Bragg grating millimeter-wave generator [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 36(11): 2945–2951.
吴树强, 裴丽, 宁提纲, 等. 新型双均匀光栅结构产生毫米波的光载无线通信下行链路[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2945–2951.

栏目编辑: 王晓琪