

利用太赫兹光非对称解复用器对归零伪随机码 占空比压缩的全光速率倍增

孙振超 王 智 吴重庆 王 甫 李 强

北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所, 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 利用太赫兹非对称解复用器(TOAD)对伪随机比特序列(PRBS)归零(RZ)码占空比压缩后经多路延迟叠加来实现速率倍增。实验上将周期为 2^7-1 、速率为 2.5 Gb/s 的伪随机 RZ 码占空比由 50% 压缩至 12.5% 后经 4 路精确延时叠加, 保持码型不变, 速率提升 4 倍至 10 Gb/s, 相对于原伪随机码, 保证误码率 10^{-9} 的功率代价为 2 dB。

关键词 光通信; 信号处理; 占空比压缩; 速率倍增; 太赫兹非对称解复用器; 半导体光放大器

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201643.0405001

All-Optical Repetition Rate Multiplication of Return to Zero Pseudorandom Bit Sequences Using Duty Ratio Compressor Based on Terahertz Optical Asymmetrical Demultiplexer

Sun Zhenchao Wang Zhi Wu Chongqing Wang Fu Li Qiang

The Key Laboratory of Luminescence and Optical Information of Ministry of Education, Institute of Optical Information, College of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044

Abstract A scheme for all-optical repetition rate multiplication of return to zero(RZ) pseudorandom bit sequences (PRBS) is demonstrated with a duty ratio compressor based on terahertz optical asymmetrical demultiplexer (TOAD) cascaded multichannel delay structure. Its feasibility is verified by experiments, which shows that the duty ratio of PRBS is compressed from 50% to 12.5% and then the bit rate is promoted from 2.5 Gb/s to 10 Gb/s with a same code type by the four-channel precise delay. The power penalty for bit error rate less than 10^{-9} of the eventual PRBS is 2 dB compared to the original PRBS.

Key words optical communications; signal processing; pulse duty compression; repetition rate multiplication; terahertz optical asymmetrical demultiplexer; semiconductor optical amplifier

OCIS codes 060.2330; 190.4360; 220.4610; 260.3160

1 引 言

伪随机码(PRBS)广泛应用于全光传输系统和全光通信网络中,例如误码率(BER, R_{BE})的检测^[1-5]、编码/解码(扰码器)^[6-8]、加密、解密(保密传输)^[9]、白噪声模拟^[10]、扩频调制(码分多址)^[11]等。然而随着光通信技术的高速发展,通信系统和网络传输速率越来越高,目前单信道已经达到了 640 Gb/s^[12],相相对于 PRBS 的速率要求也将大大提高。然而高速电域的 PRBS 发生器结构十分复杂,且成本高,特别是当传输速度达到 10 Gb/s 以上时,由于电子瓶颈的限制,这个问题越来越突出。尽管近年来提出一些高速全光 PRBS 发生方案,例如 Silvia^[13]提出利用双环耦合触发器组成线性移位寄存器后实现 PRBS 发生,该方案结构复杂而且实验上只实现了速率 10 kb/s 的 PRBS 发生; Zoiros 等^[14]提出基于太赫兹非对称解复用器(TOAD)结

收稿日期: 2015-10-20; 收到修改稿日期: 2015-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(61275075, 61378061, 61571035)、北京市自然科学基金(4144080, 4132035)

作者简介: 孙振超(1986—),男,博士研究生,主要从事伪随机码的发生和倍速方面的研究。E-mail: 11118409@bjtu.edu.cn

导师简介: 王 智(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、集成光电子器件和全光信号处理方面的研究。E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn(通信联系人)

构的 D 触发器级联实现移位寄存器,以及 Ma 等^[15-16]提出利用量子点半导体光放大器(QD-SOA)来实现 PRBS 发生,这两种方案结构也十分复杂,因此只是进行理论仿真,实验上很难实现;还有其他发生方案,但都存在诸如结构复杂、输出效果不理想、速率受限等问题^[17-18]。另一方面,为了获得高速 PRBS,可以对低速的 PRBS 提升速率。Kouloumentas 等^[19]提出利用非线性光纤环镜(NOLM)级联的结构实现 PRBS 速率倍增,该方案将 12.5 Gb/s 速率提升 4 倍速率至 50 Gb/s,输出结果有很好的消光比,虽然该方案有很多优势,但仍然有需要改进的方面,例如能量转换效率问题,NOLM 中的控制脉冲功率仅达到 240 mW,以及 180 m 的非线性光纤使其难以集成等。因此,本文提出了一种结构简单、能耗低、响应速度高的 PRBS 速率倍增系统。

根据 m 序列的抽取性质^[20]:对于一个 m 序列的 PRBS,相隔固定位数抽取一个数据,其结果仍然是该 m 序列。可以将 PRBS 归零码分为 2^n 路(n 为正整数),分别延迟 $0, T/2^n, 2T/2^n, 3T/2^n, \dots, (2^n - 1)T/2^n$ 后合束,即可将原 PRBS 的速率提高 2^n 倍,其中 T 为低速 PRBS 的周期长度。为避免合束后脉冲叠加,原 PRBS 的占空比需小于 $1/2^n$ 。由于 TOAD 具有能耗低、响应速度快、易集成以及对外界环境扰动不敏感等优点^[21],所以利用 TOAD 对低速的 PRBS 进行占空比压缩。

本文对占空比压缩和速率倍增的原理进行了分析,实验上利用 TOAD 将周期为 $2^7 - 1$ 、速率为 2.5 Gb/s 的 PRBS 归零码占空比由 50% 压缩至 12.5%,分为 4 路,分别延迟 $0, T/4(12.7 \text{ ns}), T/2(25.4 \text{ ns}), 3T/4(38.1 \text{ ns})$ 后叠加,将速率提升 4 倍至 10 Gb/s,保证误码率 10^{-9} ,功率代价为 2 dB。

2 理论模型

图 1(a)为 TOAD 环的基本结构图。时钟信号光 P_p 经过耦合器 port A 注入,被分为顺时针信号(CW)和逆时针信号(CCW),先后经过半导体放大器(SOA),控制光 P_c 经由波分复用器(WDM)注入 SOA。图 1(b)为压缩归零(RZ)码占空比示意图,控制光为占空比 50% 的 RZ 码,时钟信号是超窄占空比 RZ 码。当控制光为“0”时,CW 光和 CCW 光返回耦合器,干涉后从 port A 输出。如果适当控制 TOAD 环的开光窗口 Δt ,当控制光为“1”时,控制光对 CW 光产生交叉相位调制,而 CCW 光没有经过调制,当这 2 路时钟信号返回耦合器时,经过干涉后该脉冲从 port B 输出,进而实现占空比压缩^[22-23]。

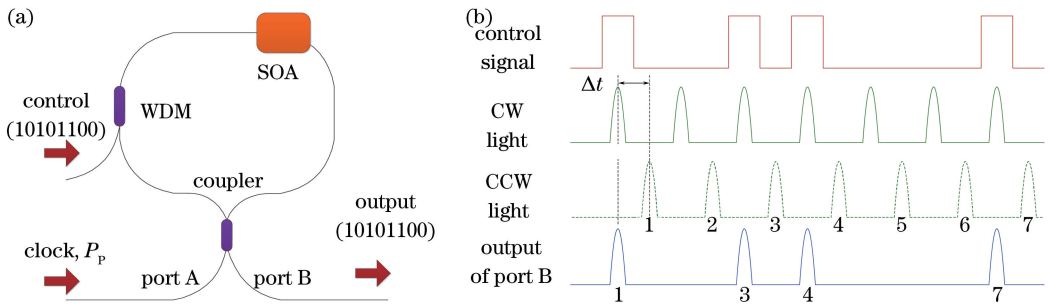


图 1 (a) TOAD 环结构图; (b) TOAD 环压缩 RZ 码占空比示意图

Fig. 1 (a) Basic structure of TOAD; (b) schematic diagram of duty ratio compression by TOAD

用 P_{sat} 表示 SOA 的饱和功率, G_0 表示 SOA 的小信号增益, G_{cw} 和 G_{ccw} 分别表示 CW 光和 CCW 光在 SOA 中的增益, 根据之前的研究, 有如下关系式^[24]:

$$G_{\text{cw}} = G_0 \exp \left[(1 - G_{\text{cw}}) \frac{P_c + P_p}{P_{\text{sat}}} \right], \quad (1)$$

$$G_{\text{ccw}} = G_0 \exp \left[(1 - G_{\text{ccw}}) \frac{P_p}{P_{\text{sat}}} \right]. \quad (2)$$

由增益和相移的关系, 非线性相移差可表示为

$$\Delta\varphi = -\frac{\alpha}{2} [(1 - G_{\text{cw}})(P_c + P_p) - (1 - G_{\text{ccw}})P_p], \quad (3)$$

式中 α 为 SOA 线宽增强因子, 如果用 k 表示环路损耗, 则 CW 光和 CCW 光由耦合器 port A 和 port B 输出

的光功率可表示为

$$P_A = \frac{1}{4}kP_p [G_{ccw} + 2\sqrt{G_{ccw}}\sqrt{G_{cw}}\cos\Delta\varphi + G_{cw}], \quad (4)$$

$$P_B = \frac{1}{4}kP_p [G_{ccw} - 2\sqrt{G_{ccw}}\sqrt{G_{cw}}\cos\Delta\varphi + G_{cw}]. \quad (5)$$

由(5)式可知,如果 $\cos\Delta\varphi \neq 1$, port B 即有脉冲输出, SOA 无需深度饱和,因此 SOA 的载流子恢复时间不会限制 TOAD 环在占空比压缩中的响应速度。

对于 m 序列的 PRBS,可以保持码型不变实现速率提升^[25],对于周期为 T 的 PRBS,将其分为 n 路,分别延迟 $0, T/2^n, 2T/2^n, 3T/2^n, \dots, (2^n - 1)T/2^n$ 后合束,即可获得速率 2^n 倍提升的高速 m 序列, n 为正整数。图 2 为短周期 PRBS(码型 1011100)的 4 倍速率提升示意图,描述速率倍增的原理。将原低速 PRBS 平均分为 4 路, T 为 PRBS 周期,第 1 路无延迟通过,第 2 路延迟 $T/4$,第 3 路延迟 $T/2$,第 4 路延迟 $3T/4$ 。由图 2 可知,经过 4 路延迟合并,PRBS 的码型(1011100)保持不变,速率提升了 4 倍。此速率倍增方案中,没有有源器件的参与,因此可应用于超高速率系统。结合基于 TOAD 结构的占空比压缩器,利用超窄脉冲时钟可以实现不同周期 PRBS 码的超高速率倍增。

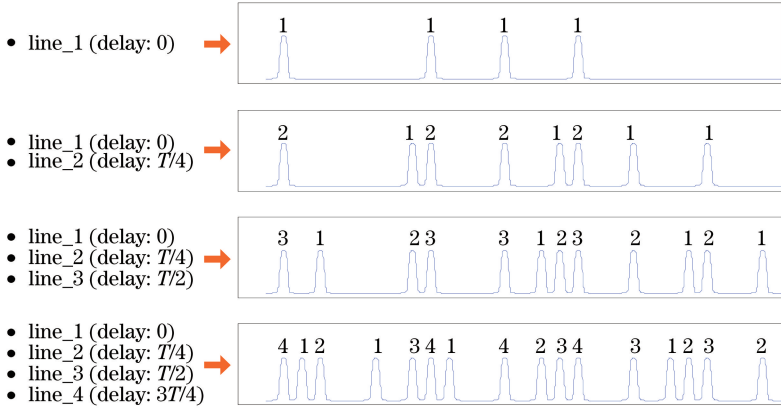
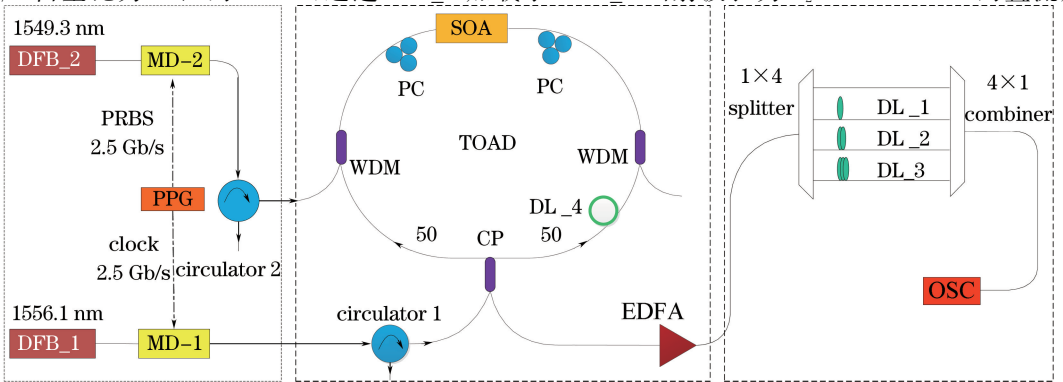


图 2 周期为 $2^3 - 1$ 的 PRBS 4 倍速率提升示意图

Fig. 2 Example of 4 times repetition rate multiplication with a PRBS at cycle $2^3 - 1$

3 实 验

具体的实验装置如图 3 所示,信号发生器(PPG)产生 2.5 Gb/s 占空比为 12.5% 的时钟信号,通过 MD_1 (modulator)加载于 DFB_1(distributed feedback laser)出射波长为 $\lambda_1 = 1556.1$ nm 的直流光上,与此同时产生 2.5 Gb/s 占空比为 50% 的 PRBS,通过 MD_2 加载于 DFB_2 出射波长为 $\lambda_2 = 1549.3$ nm 的直流光上。时



DFB: distributed feedback laser; PPG: programme pulse generator; MD: modulator; PC: polarization controller; WDM: wavelength division multiplex; EDFA: erbium-doped optical fiber amplifier; DL: delay; CP: coupler; OSC: oscilloscope

图 3 实验系统。(a)光信号发生器;(b)占空压缩比;(c)速率倍增

Fig. 3 Experimental setup. (a) Optical signal generator; (b) duty ratio compression; (c) repetition rate multiplication

钟信号经由环形器 1 从耦合器(CP)输入 TOAD 环,PRBS 经由环形器从 WDM 作为控制信号输入 TOAD 环。DL₄ 控制 TOAD 环的开关窗口为 200 ps,偏振控制器(PC)用于控制 TOAD 环中的偏振态,使得没有控制光输入时,时钟信号完全由耦合器的输入端返回。TOAD 环输入信号经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后进入速率倍增部分。DL₁、DL₂ 和 DL₃ 的延迟量分别为 $T/4$ (12.7 ns)、 $T/2$ (25.4 ns)、 $3T/4$ (38.1 ns)。

4 结果与讨论

实验结果如图 4 所示。图 4(a)为由信号源输出的 2.5 Gb/s 占空比为 50%、周期长度为 2^7-1 的 PRBS 波形图,4(b)为经过 TOAD 环压缩占空比后的 PRBS 输出波形图,4(c)是经过 4 路延迟后合并得到的 10 Gb/s 占空比为 50%的 PRBS 波形图。由图 4 可知,经过该系统速率倍增后,PRBS 的码型保持不变,占空比也保持不变,速率提高了 4 倍。

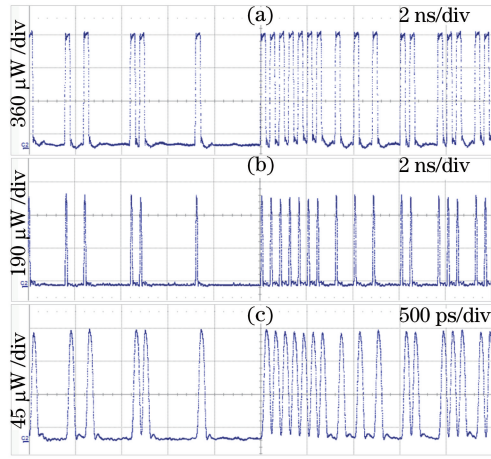


图 4 实验结果的波形图。(a) 2.5 Gb/s 占空比为 50%的 PRBS; (b) 2.5 Gb/s 占空比为 12.5%的 PRBS; (c) 10 Gb/s 占空比为 50%的 PRBS

Fig. 4 Oscillogram of experimental results. (a) Oscillogram of 2.5 Gb/s PRBS with duty ratio at 50%; (b) oscillogram of 2.5 Gb/s PRBS with duty ratio at 12.5%; (c) oscillogram of 10 Gb/s PRBS with duty ratio at 50%

图 5 为实验结果的眼图和误码率测量结果。图 5(a)为信号源输出 2.5 Gb/s、占空比为 50%的 PRBS 眼图,图 5(b)为经 TOAD 环压缩后输出 2.5 Gb/s 占空比为 12.5%的 PRBS 眼图,图 5(c)为经延迟倍速后输出

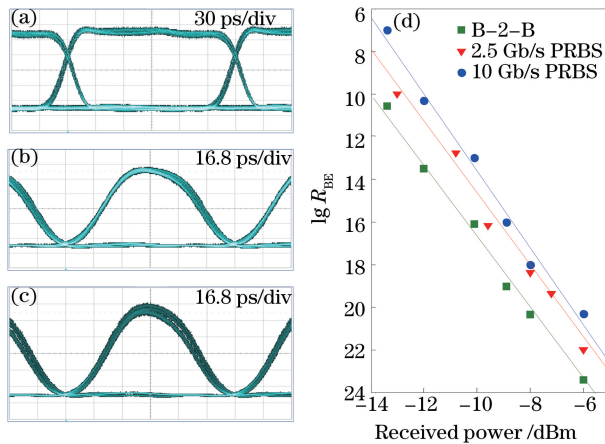


图 5 倍速结果的眼图及误码率。(a) 2.5 Gb/s 占空比为 50%的 PRBS 眼图; (b) 2.5 Gb/s 占空比为 12.5%的 PRBS 眼图; (c) 10 Gb/s 占空比为 50%的 PRBS 眼图; (d) 低速的 PRBS、占空比压缩的 PRBS 以及倍速后的 PRBS 误码率

Fig. 5 Eye diagrams and BER curves of original signal and the repetition rate multiplication results. (a) Eye diagram of 2.5 Gb/s PRBS with duty ratio of 50%; (b) eye diagram of 2.5 Gb/s PRBS with duty ratio of 12.5%; (c) eye diagram of 10 Gb/s PRBS with duty ratio of 50%; (d) BER curves of original PRBS, output of TOAD and repetition rate multiplication of PRBS

10 Gb/s、占空比为 50% 的 PRBS 眼图,图 5(d)为低速的 PRBS(B-2-B)、2.5 Gb/s 占空比为 12.5% 的 PRBS 以及倍速后 10 GB/s 占空比为 50% 的 PRBS 误码率测量结果。由图 5 可知,TOAD 的输出信号功率较小,分路前需经过 EDFA 对其放大,而 4 路延迟的透射率分别为 81.3%、82.1%、80.9% 和 81.8%,并非严格相等。因此,复用后信号质量有所下降。经过速率倍增后的输出结果与信号源输出的 PRBS 相比,保证误码率为 10^{-9} 的功率代价为 2 dB。

需要指出,普通单模光纤的色散系数为 20 ps/(km·nm),对于短周期的 PRBS 倍速,延迟线的长度较短,光纤中的色散可以忽略不计,对于超长周期的 PRBS 倍速,则光纤延迟部分需要引入适当的色散管理方案。

5 结 论

综上所述,利用 TOAD 对伪随机 RZ 码 PRBS 占空比压缩后经多路延迟叠加实现了 PRBS 速率倍增。实验上将周期为 2^7-1 速率为 2.5 Gb/s 的伪随机 RZ 码占空比由 50% 压缩至 12.5% 后经 4 路精确延时叠加,速率提升 4 倍至 10 Gb/s,相对于原 PRBS,保证误码率为 10^{-9} 的功率代价为 2 dB。

参 考 文 献

- 1 Chen Z, Gu L, Tan Z, *et al.*. Real-time video signal transmission over a terahertz communication link[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(11): 112001.
- 2 Schmogrow R, Nebendahl B, Winter M, *et al.*. Error vector magnitude as a performance measure for advanced modulation formats[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(1): 61-63.
- 3 Yang Fu, He Yan, Chen Weibiao. Study of fiber laser ranging system using pseudorandom modulation and single photon counting techniques[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0314003.
杨 馥, 贺 岩, 陈卫标. 基于伪随机码调制和单光子计数的光纤激光测距研究[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0314003.
- 4 Scheers B, Le Nir V. Pseudo-random binary sequence selection for delay and add direct sequence spread spectrum modulation scheme[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(11): 1002-1004.
- 5 Zoiros K E, Houbavlis T, Kalyvas M. Ultra-high speed all-optical shift registers and their applications in OTDM networks [J]. Optical and Quantum Electronics, 2004, 36(11): 1005-1053.
- 6 Nandan S, Deepthi P P, Stuart C M. Lowcomplex crypto based channel coding[C]. Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2012 International Conference on, IEEE, 2012: 863-868.
- 7 Engelhardt K, Seitz P. Absolute, high-resolution optical position encoder[J]. Applied Optics, 1996, 35(1): 201-208.
- 8 De Graauw T, Th Veltman B P. Pseudo-random binary sequences for multiplex codes[J]. Applied Optics, 1970, 9(12): 2658-2660.
- 9 Wang X, Yu Q. A block encryption algorithm based on dynamic sequences of multiple chaotic systems[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009, 14(2): 574-581.
- 10 Canyelles-Pericas P, Burton A, Le-Minh H, *et al.*. Chaos synchronization on visible light communication with application for secure data communications[C]. AFRICON, 2013, IEEE, 2013: 1-5.
- 11 Aldouri M Y, Aljunid S A, Ahmad R B, *et al.*. Bit error rate (BER) performance of return-to-zero and non-return-to-zero data signals optical code division multiple access (OCDMA) system based on AND detection scheme in fiber-to-the-home (FTTH) networks[J]. Optica Applicata, 2011, 41(1): 173-181.
- 12 Hansen Mulvad H C, Tangdionga E, Raz O, *et al.*. 640 Gbit/s OTDM lab-transmission and 320 Gbit/s field-transmission with SOA-based clock recovery[C]. Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2008: OWS2.
- 13 Silvia Wagemans. Towards an all-optical pseudo-random binary sequence generator[D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2005.
- 14 Zoiros K E, Das M K, Gayen D K, *et al.*. All-optical pseudorandom binary sequence generator with TOAD-based D flip-flops[J]. Optics Communications, 2011, 284(19): 4297-4306.
- 15 Ma S, Sun H, Chen Z, *et al.*. High speed all-optical PRBS generation based on quantum-dot semiconductor optical amplifiers [J]. Optics Express, 2009, 17(21): 18469-18477.
- 16 Li W, Hu H, Dutta N K. High speed all-optical PRBS generation using binary phase shift keyed signal based on QD-SOA [C]. SPIE, 2014, 9202: 92022O.

- 17 Chattopadhyay T, Moniem T A, Maity H K. All-optical pseudorandom binary sequence (PRBS) generator using the hardlimiters[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(20): 4252-4256.
- 18 Wu X. Optical pseudo-random bit sequence generator using a dual-drive Mach-Zehnder modulator as a linear feedback shift register[C]. *LEOS 2008-21st Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, 2008: 274-275.
- 19 Kouloumentas C, Stamatidis C, Zakynthinos P, et al.. Repetition rate multiplication of pseudorandom bit sequences[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(7): 456-458.
- 20 P H Bardell, W H McAnney, J Savir. Pseudorandom sequence generators, in built-in test for VLSI; Pseudorandom techniques[M]. New York: Wiley, 1987: 61-88.
- 21 Sokoloff J P, Prucnal P R, Glesk I, et al.. A terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD) [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 1993, 5(7): 787-790.
- 22 Sun Zhenchao, Wang Zhi, Liu Lanlan, et al.. Key techniques for all-optical repetition rate multiplication of pseudorandom bit sequences[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0105008.
孙振超, 王 智, 刘岚岚, 等. 全光伪随机码倍速关键技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0105008.
- 23 Sun Zhenchao, Wang Zhi, Wu Chongqing, et al.. Tailoring return to zero-code duty ratio using a continuous adjustable switch window terahertz optical asymmetrical demultiplexer[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1209003.
孙振超, 王 智, 吴重庆, 等. 利用开关窗口连续可调的太赫兹非对称解复用器实现归零码占空比调节[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1209003.
- 24 Feng Gang. The theoretical study of TOAD's switching characteristic[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003:21-42.
冯 刚. 太赫兹全光解复用器(TOAD)开关特性的理论研究[D]. 南京:南京理工大学,2003:21-42.

栏目编辑: 王晓琰