

文章编号: 0258-7025(2009)02-0383-04

全光模数转换器中基于拉曼自频移的光量化

梁 锐¹ 周晓军^{1,2} 李和平^{1,2} 刘永智^{1,2} 刘 永^{1,2}

¹ 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054
² 电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054

摘要 采用分步傅里叶方法对广义薛定谔方程进行数值求解,研究了光子晶体光纤(PCF)中拉曼自频移用于全光模数转换器(ADC)中的光量化过程。计算结果表明,脉宽 300 fs,中心波长 1550 nm 的高斯脉冲入射到长 15 m 的光子晶体光纤中,入射脉冲峰值功率在 110~180 W 之间变化时,由拉曼自频移形成的拉曼孤子的中心波长随功率近似线性变化,有 60 nm 的动态变化范围,可以达到 3 bit 的量化精度。

关键词 物理光学; 全光模数转换; 光量化; 拉曼自频移; 光子晶体光纤; 分步傅里叶方法

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20093602.0383

Optical Quantization in All-Optical Analogy-to-Digital Converter Based on Raman Self-Frequency Shift

Liang Rui¹ Zhou Xiaojun^{1,2} Li Heping^{1,2} Liu Yongzhi^{1,2} Liu Yong^{1,2}

¹ School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

² Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract In this paper, optical-quantization in all-optical analogy-to-digital converter (ADC) has been achieved based on the Raman self-frequency shift in a photonic crystal fiber (PCF) by numerically solving the generalized nonlinear Schrödinger (GNLS) equation, where the split-step Fourier method (STFM) is used. Gauss-shape pulse with pulse width of 300 fs and central wavelength of 1550 nm and the PCF with length of 15 m are used in the simulation. The simulating results show that the center wavelength of the Raman soliton varies linear with the peak power of the input pulse between 110 W and 180 W, where 60 nm dynamic shift can be obtained. In this case, 3 bit quantization accuracy can be achieved.

Key words physical optics; all-optical analog-to-digital conversion; optical quantization; Raman self-frequency shift; photonic crystal fiber; split-step Fourier method

1 引 言

模数转换器(ADC)是数字技术的核心器件,在高速通信、雷达信号处理、图像处理,空间通信等领域都有广泛的应用。目前的电模数转换器技术已经相当成熟,但是由于载流子迁移速率存在物理极限,使得电模数转换器有其不可克服的发展瓶颈,提高采样速度的发展空间已十分有限。全光模数转换可

以克服电模数转换器的这一瓶颈,是实现超高速信号数字化的新途径。

模数转换器由采样、量化和编码三部分组成。采样速率和量化精度是衡量模数转换器性能的关键技术指标,其中量化技术是模数转换器量化精度大小的决定性因素,所以如何提高全光量化的量化精度是当前面临的巨大挑战之一,也是实现高精度全

收稿日期: 2008-08-27; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z269)和国家自然科学基金重点项目(60736038)资助课题。

作者简介: 梁 锐(1983-),女,博士研究生,主要从事受激拉曼散射方面的研究。E-mail: lrui@uestc.edu.cn

导师简介: 周晓军(1955-),女,教授,博士生导师,主要从事光纤技术及计算电磁学等方面的研究。

E-mail: xjzhou@uestc.edu.cn

光模数转换器的关键。早在 1979 年 Taylor 就提出了基于波导的马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪阵列来实现光学量化的方法^[1],其后又有人提出利用光纤中的非线性效应如孤子的拉曼自频移效应^[2~6]和形成超连续谱^[7,8]等进行光量化。

本文采用超短脉冲在高非线性光纤中的拉曼自频移效应实现光的量化。光子晶体光纤(PCF)模场面积较小,非线性系数为普通高非线性光纤的几倍甚至十几倍^[9],在光量化过程中被用作非线性拉曼自频移介质。

2 分 析

2.1 全光模数转换器

如图 1 所示,全光模数转换器由全光采样、全光量化和编码组成。在全光采样中,对模拟光信号进行高速采样,将模拟光信号变为脉冲峰值功率为模拟信号包络调制的脉冲信号;然后利用高非线性光纤的拉曼自频移效应,对信号光波实现功率-波长的调制转换并按波长分离,实现对采样后光脉冲的量化;最后在空间光学编码器中进行编码,从而实现数字光信号的输出。

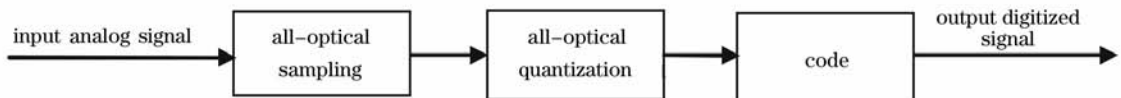


图 1 全光模数转换器系统图

Fig. 1 Systemic diagram of all-optical analogy-to-digital converter

2.2 基于拉曼自频移的光量化

光纤内的拉曼延迟响应会使具有高功率、窄脉宽的脉冲光谱发生红移,这种现象称为拉曼自频移(RSFS)^[10]。如图 2 所示,光量化过程按照如下方式进行:采样后的脉冲串有不同的峰值功率,通

过光子晶体光纤后^[11],由于拉曼自频移效应不同的峰值功率使输出光脉冲中心波长产生不同的长波长方向的移动,从而实现功率-波长转换;不同波长的光脉冲用阵列波导光栅(AWG)在空间分离^[12];然后,送入编码器。

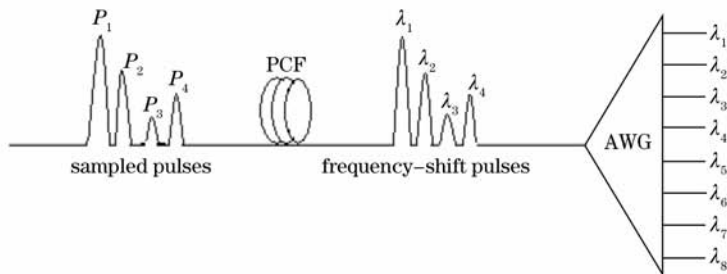


图 2 基于拉曼自频移的光量化系统示意图

Fig. 2 Systemic diagram of the optical quantization which based on the RSFS

超短脉冲在光纤中的传输可用广义非线性薛定谔方程(GNLS)描述

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma \left[|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right], \quad (1)$$

式中 A 和 ω_0 分别为光脉冲包络的振幅和中心角频率, T 和 z 分别为随群速度移动的坐标系的时间和空间位移, $\alpha, \beta_2, \beta_3, \gamma, T_R$ 分别为光纤的损耗系数、群速度色散(GVD)系数、三阶色散(TOD)系数,非线性系数和拉曼响应函数的一阶矩。忽略(1)式中的光纤损耗、三阶色散项和自陡项,用矩量法可求得脉冲中心角频率变化量 $\Delta\omega_R$ 为^[10]

$$\Delta\omega_R(z) = -8T_R\gamma P_0 z / (15T_0^2), \quad (2)$$

式中 P_0 为入射脉冲的峰值功率, T_0 为入射脉冲的半宽(功率 $1/e$ 点定义)。在 T_0 保持不变的情况下,

拉曼自频移量 $\Delta\omega_R$ 随 P_0 的增加而增加,此特性正是采样后不同峰值功率脉冲的波长量化的基础。由(2)式可知,光纤非线性系数 γ 值越大, $\Delta\omega_R$ 就会越大,非线性系数大的光子晶体光纤可有效地进行功率-波长转换。因此,选用在可调谐孤子源中已证实能够在很宽的波长范围(1550~1677 nm)工作的光子晶体光纤^[9],其参数如表 1 所示。

拉曼自频移与光纤的拉曼响应系数 T_R 有关,Atieh 等^[13]得出了在常规 SiO_2 光纤中 $T_R = (3 \pm 1)$ fs 的结论。为保证光量化计算的准确性,需要确定光

子晶体光纤 T_R 的大小。根据实验测量数据^[9], 确定 $T_R=4.3$ fs, 表 2 为光子晶体光纤拉曼自频移后的输出中心波长的计算值与实验值的比较。

表 1 PCF 在 1550 nm 工作波长时的各项参数

Table 1 Parameters of PCF at 1550 nm

Core diameter / μm	1.7
Zero-dispersion wavelength /nm	780
Nonlinearity /($\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)	62
Dispersion /($\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$)	119
Dispersion slope /($\text{fs}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$)	-220
Loss /(dB/km)	40

表 2 拉曼自频移后的中心波长计算值与实验值的比较

Table 2 Comparison between numerical results and experimental results of the center wavelength after the RSFS

Average power /mW	Numerical results /nm	Experimental results /nm	Absolute error /nm	Relative error /%
8	1560	1560	0	0
810	1610.7	1610	0.7	0.04
950	1643	1641	2	0.12
1070	1679.7	1677	2.7	0.16

3 功率-波长转换的数值模拟

光脉冲在光子晶体中的传播满足广义非线性薛定谔方程(1)。方程包含拉曼自频移, 也包含自相位调制、自陡效应和二阶、三阶色散效应及损耗, 我们采用分步傅里叶方法^[14]对广义非线性薛定谔方程进行数值求解, 以下是模拟计算的结果。

图 3 是脉宽为 300 fs, 峰值功率为 150 W 的高斯脉冲入射时, 拉曼自频移后的中心波长与光子晶体光纤长度的关系。由图 3 可知, 拉曼自频移后的中心波长与 PCF 长度呈近似线性关系, 与(2)式一致。

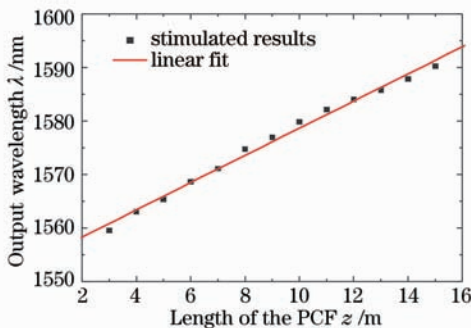


图 3 入射脉冲峰值功率为 150 W 时, 拉曼自频移后的中心波长与 PCF 长度的关系

Fig. 3 Numerical results of the relationship between the center wavelength after the RSFS and the length of the PCF in the case of the peak power of input pulse $P_0=150$ W

图 4 为同样脉冲系数下, PCF 长度 15 m 时, 拉曼自频移后的中心波长随输入脉冲峰值功率的变化曲线。从图 4 可知, 在入射脉冲峰值功率较小的情况下, 脉冲的拉曼自频移幅度很小, 且变化不明显。随着入射脉冲峰值功率的增加, 拉曼自频移逐渐增加, 且其随峰值功率的变化速率也增加。当输入脉冲峰值功率在 110~180 W 之间变化时, 拉曼自频移量从 13~73 nm 逐渐增加, 有 60 nm 的波长范围用于光脉冲的波长量化。

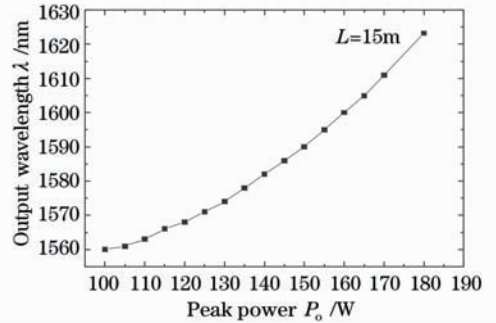


图 4 PCF 长 15 m 时, 拉曼孤子中心波长与输入脉冲峰值功率之间的关系

Fig. 4 Numerical results of the relationship between the center wavelength after the RSFS and the peak power of input pulse in case of the length of the PCF $z=15$ m

图 5 为光纤长度 15 m 时, 输入脉冲峰值功率在 110~180 W 之间以 10 W 间隔取 8 个不同值下的输出光谱, 其中峰值功率 110 W 和 180 W 时对应的输出谱宽分别为 8.8 nm 和 14.4 nm。为提高编码精度, 加入阵列波导光栅进行空间波长分离。不同功率条件下 AWG 各通道的输出光脉冲峰值功率如表 3 所示, 通过设定 AWG 各通道判决阈值, 在 60 nm 的动态频移范围内可以实现 8 种量化状态,

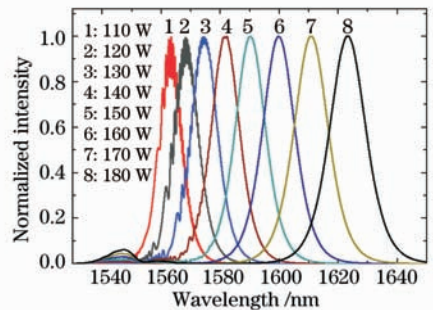


图 5 PCF 长 15 m 时输入脉冲峰值功率变化的情况下的输出光谱

Fig. 5 Numerical results of output spectrum after the RSFS by changing the peak power of input pulse in the case of the length of the PCF $z=15$ m

对应 3 bit 量化精度。

表 3 不同入射脉冲峰值功率下,AWG 各通道的输出峰值功率

Table 3 Output peak power of each AWG channel at different input peak power

Peak power of input pulse /W	Channel 1563 nm	Channe2 1568 nm	Channe3 1574 nm	Channe4 1582 nm	Channe5 1590 nm	Channe6 1600 nm	Channe7 1611 nm	Channe8 1623 nm
110	0.82627	0.36376	0.043922	1.96×10^{-3}	8.79×10^{-5}	1.90×10^{-6}	2.97×10^{-8}	3.18×10^{-10}
120	0.39207	0.82084	0.31389	0.021784	1.24×10^{-3}	3.52×10^{-5}	7.42×10^{-7}	1.10×10^{-8}
130	0.083001	0.31822	0.80997	0.21533	0.01756	6.74×10^{-4}	1.94×10^{-5}	4.05×10^{-7}
140	0.010033	0.041896	0.25826	0.79918	0.20442	0.010791	3.82×10^{-4}	9.91×10^{-6}
150	0.0041	5.50×10^{-3}	0.026972	0.25268	0.79177	0.16116	7.6×10^{-3}	2.41×10^{-4}
160	3.96×10^{-3}	9.12×10^{-4}	2.60×10^{-3}	0.023725	0.18789	0.77884	0.13525	5.49×10^{-3}
170	4.28×10^{-3}	8.86×10^{-4}	2.08×10^{-4}	1.71×10^{-3}	0.013642	0.1619	0.76508	0.12228
180	5.24×10^{-4}	8.48×10^{-4}	4.54×10^{-5}	1.20×10^{-4}	8.95×10^{-4}	0.01043	0.13978	0.7497

4 结 论

通过数值求解广义非线性薛定谔方程,研究了亚皮秒脉冲在高非线性光子晶体光纤中的拉曼自频移效应,并验证了其用于全光数模转换中光量化的可行性。计算结果表明脉宽 300 fs,峰值功率在 110~180 W 之间变化的高斯脉冲入射到长 15 m 的光子晶体光纤时,拉曼自频移有 60 nm 的线性变化范围,对未经过谱压缩的输出光脉冲,可以达到 3 bit 的量化精度。同样的入射脉冲情况下,对普通的高非线性光纤如 3M-FS-PM-7811 光纤^[15],光纤非线性系数 γ 为 $4.4 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,光纤长度 200 m 时只能实现 30 nm 的拉曼自频移动态范围。由此可见,与普通高非线性光纤相比,应用光子晶体光纤可以用较短的长度实现较宽的波长动态变化范围。目前的输出光脉冲谱宽在 10 nm 左右,进一步压缩谱宽,可以实现更高精度的量化。

参 考 文 献

- 1 H. F. Taylor. An optical analog-to-digital converter-design and analysis[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **QE-15**(4): 210~216
- 2 T. Konishi, K. Tanimura, K. Asano. All-optical analog-to-digital converter by use of self-frequency shifting in fiber and a pulse-shaping technique [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(11): 2817~2823
- 3 C. Xu, X. Liu. Photonic analog-to-digital converter using soliton self-frequency shift and interleaving spectral filters [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(12): 986~988
- 4 S. I. Oda, A. Maruta, L. I. Kitayama. All-optical quantization scheme based on fiber nonlinearity[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 587~589
- 5 Takashi Nishitani, Tsuyoshi Konishi, Kazuyoshi Itoh. Integration of a proposed all-optical analog-to-digital converter using self-frequency shifting in fiber and a pulse-shaping technique[J]. *Opt. Rev.*, 2005, **12**(3): 237~241
- 6 Takashi Nishitani, Tsuyoshi Konishi, Kazuyoshi Itoh. Resolution improvement of all-optical analog-to-digital conversion employing self-

frequency shift and self-phase-modulation-induced spectral compression [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2008, **34**(3): 724~732

- 7 S. I. Oda, A. Maruta. A novel quantization scheme by slicing supercontinuum spectrum for all-optical analog-to-digital conversion [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 165~167
- 8 S. I. Oda, A. Maruta. 2-bit all-optical analog-to-digital conversion by slicing supercontinuum spectrum and switching with nonlinear optical loop mirror and its application to quaternary ASK-to-OOK modulation format converter [J]. *IEICE Trans. Commun.*, 2005, **E88-B**(5): 1963~1967
- 9 Kazi S. Abedin, Fumito Kubota. Widely tunable femtosecond soliton pulse generation at a 10-GHz repetition rate by use of the soliton self-frequency shift in photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(19): 1760~1762
- 10 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 4th ed., New York: Academic Press, 2007
- 11 Zhou Bing, Jiang Yongliang, Chen Xiaowei *et al.*. Numerical simulation on propagation of ultra-short laser pulse in photonic crystal fibers with different group velocity dispersion parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 323~328
- 周冰,姜永亮,陈晓伟等.超短激光脉冲在不同色散参量光子晶体光纤中传输的数值模拟[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 323~328
- 12 Li Wei, Chen Long, Huang Dexiu. Design and implementation of an array optical receiver device of density wavelength-division multiplexing-PIN-TIA for wavelength-division multiplexing passive optical networks[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 82~86
- 李蔚,陈龙,黄德修.一种应用于波分复用无源光网络系统中的滤波片-PIN-TIA 阵列光接收组件[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 82~86
- 13 A. K. Atieh, P. Myslinski, J. Chrostowski *et al.*. Measuring the Raman time constant (TR) for soliton pulses in standard single-mode fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(2): 216~221
- 14 Tu Chenghou, Lei Ting, Li Yongnan *et al.*. Ultra-short pulses self-similar evolution conditions in normal dispersive fiber amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1512~1516
- 涂成厚,雷霆,李勇男等.正常色散光纤放大器中超短脉冲的自相似演化条件[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1512~1516
- 15 Norihiko Nishizawa, Toshio Goto. Compact system of wavelength-tunable femtosecond soliton pulse generation using optical fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(3): 325~327