

# 基于孤子自频移现象的高比特全光量化仿真研究

吴 侃<sup>1</sup> 陈 颖<sup>2</sup> 陈向宁<sup>2</sup> 陈建平<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

<sup>2</sup>中国人民解放军装备学院光电装备系, 北京 101416

**摘要** 探讨了基于孤子自频移(SSFS)效应的高精度全光量化技术。通过仿真分析孤子自频移特性,发现当输入脉冲的脉宽在150 fs时,量化比特位(NOBS)可以达到8,对应的有效比特位(ENOB)为7.02。更小的脉宽无法保证量化比特位,而更宽的脉宽则会影响量化函数的线性度,降低有效比特位。150 fs对应的谱宽9.8 nm和平均功率0.92 W(50 GHz的脉冲速率下)也都可以较容易地由已有的光学技术得到。而啾啾会展宽脉宽,显著降低量化比特位和有效比特位,因此需尽量避免。

**关键词** 光纤光学;全光量化;孤子自频移;非线性

中图分类号 TN929

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0319004

## Investigation on High-Bit All Optical Quantization Based on Soliton Self-Frequency Shift Effect

Wu Kan<sup>1</sup> Chen Ying<sup>2</sup> Chen Xiangning<sup>2</sup> Chen Jianping<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory on Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

<sup>2</sup>Department of Optoelectronics, Academy of Equipment of Chinese People's Liberation Army, Beijing 101416, China

**Abstract** The high-precision all optical quantization technology based on soliton self-frequency shift (SSFS) effect is investigated. It is still unclear whether this technology is able to achieve high-precision quantization although some experimental results have been reported. Investigating the properties of SSFS effect by simulation, it is found that for a soliton pulse with optimal  $\tau=150$  fs, the number of bits (NOB) can be up to 8 with the effective number of bits (ENOB) equal to 7.02. Narrower pulse width cannot obtain the same NOB whereas wider pulse width affects the linearity of the quantization function and reduces the ENOB. A pulse width of 150 fs requires a bandwidth of 9.8 nm and an average power of 0.92 W under 50 GHz sampling pulse rate, which is within the capability of current optical technologies. Chirp broadens the pulse width and reduces the NOB and ENOB significantly and thus should be avoided.

**Key words** fiber optics; all optical quantization; soliton self-frequency shift; nonlinearity

**OCIS codes** 190.3970; 070.4340; 320.7140; 060.2360

## 1 引 言

模拟数字转换器(ADC)使得现代数字信号处理技术能够应用于自然界的模拟信号,并由此带来了非常广泛的应用,包括:通信系统中的信号采集和处理<sup>[1-2]</sup>,传感中的信号处理等<sup>[3-6]</sup>。我国在光采样和信号处理上也展开了系统的研究<sup>[7-11]</sup>。受限于电学系统的带宽和噪声特性,光学模数转换器因其具有潜在的高带宽和低噪声特性而受到越来越多的关注<sup>[12-13]</sup>。在一个光学ADC系统中,对被测信号的采样通常是由高速、低噪声光

收稿日期:2014-09-18;收到修改稿日期:2014-11-5

基金项目:上海市扬帆计划(14YF1401600)、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室自主研究课题(GKZD030033)

作者简介:吴侃(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事光纤非线性及全光量化方面的研究。

E-mail: kanwu@sjtu.edu.cn

脉冲来完成<sup>[14-19]</sup>。而在目前提出的大多数方案中,光采样后的量化处理仍然采用传统的电学 ADC。这样做的好处是可以充分利用电学 ADC 领域已经比较成熟的技术方案,然而缺点也比较明显,即虽然由于光采样及光学系统设计,可以将采样速率提高若干倍,但是整个系统带宽和速率仍然会受限于电学 ADC 的带宽。与此同时,全光量化相比电学量化具有更高的带宽,也受到了越来越多的关注。目前比较典型的全光量化方案包括基于孤子自频移(SSFS)效应<sup>[20-22]</sup>和超连续谱切割<sup>[23]</sup>的设计。当仅考虑量化部分时,6 比特全光量化已经在 SSFS 系统中被实现<sup>[20]</sup>,并且 7 比特量化也进行了初步讨论<sup>[21]</sup>。相比于超连续谱切割的方案,基于 SSFS 的方案具有更好的量化线性度,这为后续信号处理带来非常多的便利。因此 SSFS 是一种非常具有潜力的全光量化技术。

然而,虽然有了一些实验和仿真的研究,目前尚无相关工作探讨 SSFS 技术所能达到的性能极限,即采用 SSFS 技术的全光量化方案,在量化级最高能够达到多少比特位(NOBS)和有效比特位(ENOB)。而这些指标非常重要,因为它们决定了该项技术可能的潜在应用领域,例如模拟雷达系统需要超过 8 比特的 ENOB,而一个数字光通信系统则可能只需要 4 比特的 ENOB。不但如此,预先了解脉冲参数和啁啾对系统的影响,也能为以后的实验设计提供指导。

本文通过仿真模拟,研究了基于 SSFS 实现高比特全光量化的技术,并探讨了在现有光学技术的条件下,实现高量化比特所需要的系统参数。仿真发现,当输入脉冲宽度为 150 fs 时,NOB 可以达到 8 比特,相应的 ENOB 为 7.02(均匀量化)。当脉宽增大时,同样的脉冲峰值功率导致更高的脉冲功率,虽然孤子自频移也更大,但不足以增加一个比特,反而会降低量化函数的线性度,减小 ENOB。同时,脉冲啁啾会展宽脉宽,从而显著降低 NOB,所以也应避免。

## 2 原理与仿真

孤子自频移效应可以描述如下:当超短脉冲在一非线性介质中传播时,例如高非线性光纤(HNLF),脉冲自陡效应和拉曼效应使得脉冲频谱发生分裂。一部分的频谱成分仍然位于输入频率 $\nu_0$ 处,另一部分频谱成分(色散波)则向低频区域偏移。对应的频率偏移 $\Delta\nu$ 取决于输入脉冲的峰值功率、脉冲能量、光纤的非线性参数和传播距离。尽管理论分析表明频移 $\Delta\nu$ 正比于脉冲峰值功率的平方,实验与仿真结果都显示频移与脉冲峰值功率呈现近似线性的关系<sup>[22]</sup>。对于线性量化系统来说,这非常重要,因为更好的线性关系会得到更高的 ENOB。

基于 SSFS 效应的全光量化系统如图 1 所示。光脉冲经过对被测电信号的采样后,其峰值功率正比于被测电型号的幅度。此处为了研究量化系统本身对 NOB 和 ENOB 的影响,假设采样系统是理想的,即光脉冲对被测信号的采样不产生额外误差,光脉冲的峰值功率如实反映了被测信号的幅度。不同峰值功率的光脉冲经过一段 HNLF 后,由于 SSFS 效应产生频移,根据频移量 $\nu_0$ 的大小可以实现对输入光脉冲峰值功率的量化。最后通过一个频率选择器件,例如波分解复用器(DMUX),不同频率通过或波长的频率成分通过不同通道输出,从而对应到不同比特位。

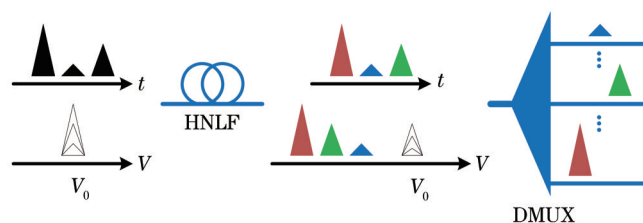


图 1 基于孤子自频移效应的全光量化示意图

Fig.1 Schematic diagram of the optical quantization based on soliton self-frequency shift

脉冲在非线性质中的传播由非线性薛定谔方程描述<sup>[24]</sup>:

$$\frac{\partial A(z, T)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A(z, T) + j \left[ \sum_{k=2}^{\infty} \frac{j^k \beta_k}{k!} \frac{\partial^k}{\partial T^k} \right] A(z, T) + j\gamma \left( j\tau_s \frac{\partial}{\partial T} \right) \left[ A(z, T) \int_0^{+\infty} R(T') |A(z, T - T')|^2 dT' \right], \quad (1)$$

式中  $A(z, T)$  是脉冲幅度的包络,  $\alpha$  是损耗系数,  $\beta_2$  是光纤的色散参数,  $\gamma$  是光纤的克尔非线性系数,  $\tau_s$  是自陡效应系数以及  $R(T)$  是光纤拉曼响应函数。使用文献[20]中相同的 HNLf 光纤参数, 即  $\beta_2 = -9 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,  $\beta_3 = 0.065 \text{ ps}^3/\text{km}$ ,  $\gamma = 15 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  以及光纤长度 1 km。自陡效应系数  $\tau_s$  取典型值 0.7 fs。工作波长为 1550 nm 附近。输入脉冲是孤子, 表示为

$$A(z=0, T) = A_0 \operatorname{sech}(T/\tau), \quad (2)$$

式中  $A_0$  是脉冲幅度, 单位是  $\text{W}^{0.5}$ ,  $\tau$  是脉宽。脉冲峰值功率等于  $A_0^2$ , 半峰全宽脉宽 (FWHM) 等于  $\tau_{\text{FWHM}} = 1.7627\tau$ 。

首先探讨当  $\tau = 150 \text{ fs}$  (或  $\tau_{\text{FWHM}} = 264 \text{ fs}$ ) 时的输入脉冲。变换极限的脉冲被注入到 1 km 长的 HNLf 中, 图 2 给出了典型的频谱随传播距离演化的关系, 其中  $A_0 = 6 \text{ W}^{0.5}$ 。

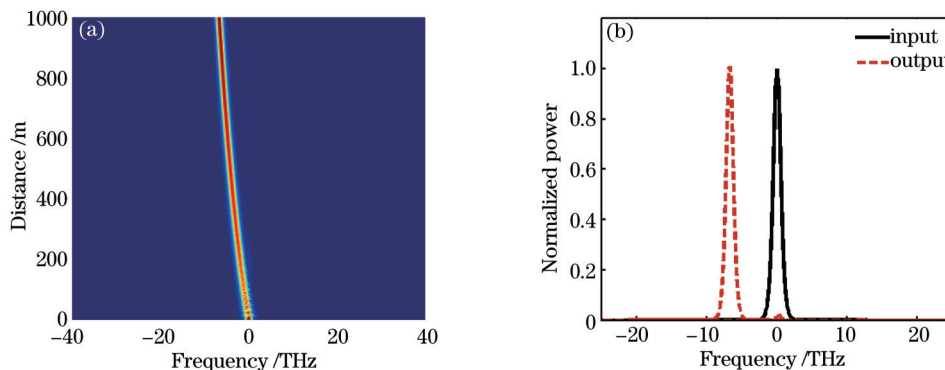


图 2 当  $A_0 = 6 \text{ W}^{0.5}$  时的脉冲频谱演化。(a) 随传播距离的演化; (b) 输入与输出端的脉冲频谱

Fig.2 Typical pulse spectral evolution with  $A_0 = 6 \text{ W}^{0.5}$ . (a) Evolution along the propagation distance; (b) input and output spectra

在输入端 (即 1 km HNLf 光纤尾端), 由 SSFS 效应导致的频移可以清晰地观察到。不但如此, 还可以看出大部分频谱功率参与了频移过程, 只有很小一部分频谱功率保留在了原始的输入频率处。在一个量化系统中, 这种现象意味着参与量化的频谱功率很多, 也即量化的效率高。在本例中, 有 98.6% 的频谱功率参与了频移量化的过程, 只有 1.4% 残余功率没有参与。

当输入脉冲幅度  $A_0$  从  $5 \text{ W}^{0.5}$  变化到  $8 \text{ W}^{0.5}$  时 (即峰值功率从 25 W 变化到 64 W), 频谱的演化由图 3 所示。图 3(a) 给出了不同峰值功率下的频谱图, 图 3(b) 给出了频移与输入峰值功率 (即输入脉冲幅度的平方) 的关系。可以清楚地看到, 频移与输入峰值功率呈现出非常好的线性关系。显然, 这对实现高 ENOB 的线性量化非常重要。此外, 频移范围 (最大频移减去最小频移) 超过 16 THz, 也为高比特量化提供保障。

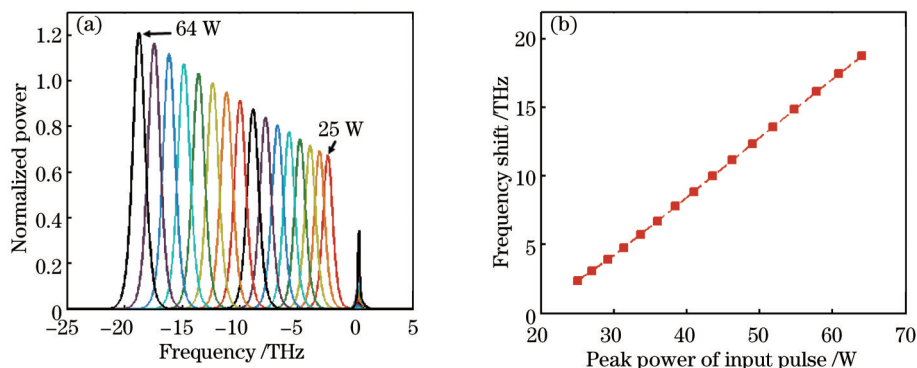


图 3 (a) 输出频谱; (b) 频移随峰值功率增大的变化关系

Fig.3 (a) Output spectra; (b) frequency shifts with respect to the input peak powers  $P = A_0^2$

由于 SSFS 效应在产生频移的同时也会导致频谱的展宽, 需要对频谱进行压缩才能实现高比特的量化。典型的方法包括基于自相位调制 (SPM) 的频谱压缩和基于相位调制的频谱压缩。本文重点探讨 SSFS 效应本身对量化的影响, 因此有关频谱压缩的方法并不在讨论范围中。由于采用了相同的光纤参数, 可以直接使用文献[21]中的结论: 若采用基于自相位调制的频谱压缩技术, 频谱宽度可以被压缩至 1 nm, 对应于 125 GHz 的带

宽;若采用基于相位调制的频谱压缩技术,则可以进一步将频谱压缩至 0.4 nm,对应于 50 GHz 的带宽。若选取 60 GHz 作为一个量化阶,16 THz 的频移范围内,可以有  $16 \text{ THz} / 60 \text{ GHz} = 266$  个量化阶。这意味着可以实现 8 比特的全光量化(256 个量化阶)。通过分析图 3(b)中频移与输入峰值功率的关系,可以得到量化函数,如图 4 所示。理想量化函数通过假设频移与峰值功率具有理想线性关系而得到。非理想的量化函数则由频移与峰值功率间实际的对应关系计算得到。通过对非理想的量化函数输入一个正弦信号,并计算傅里叶变换后频谱的信号与杂散功率的比值,可得到 ENOB 等于 7.02。频移与峰值功率间非理想的对应关系限制了量化精度。

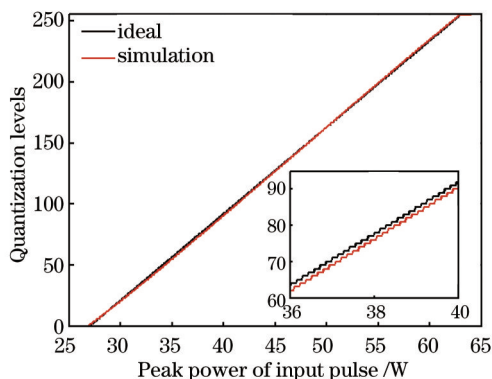


图 4 8 比特量化的量化函数。插图:放大的量化函数

Fig.4 Quantization functions for 8-bit quantization. Inset: a zoomed view of the quantization functions

### 3 讨 论

#### 3.1 脉宽的影响

除了脉冲的峰值功率,脉冲的宽度也会对 SSFS 效应导致的频移产生影响。分析脉宽对频移的影响,可以有助于在进行量化时,选择合适的脉冲参数。研究三种不同的脉宽  $\tau = 150, 200, 250 \text{ fs}$ 。对于脉宽小于 150 fs,如 100 fs 的情况下,无法支持 8 个量化比特位,所以未予讨论。图 5 给出了相同峰值功率下,不同脉宽和能量的脉冲频谱演化。显然,由于更高的脉宽对应于更大的脉冲能量,也就导致了更大的频移。然而,同时也可以发现,当脉宽较宽时,相比于 150 fs 的情况,更多的频谱能量留在了输入频率处而未参与频移,也即量化过程中的功率利用效率降低。

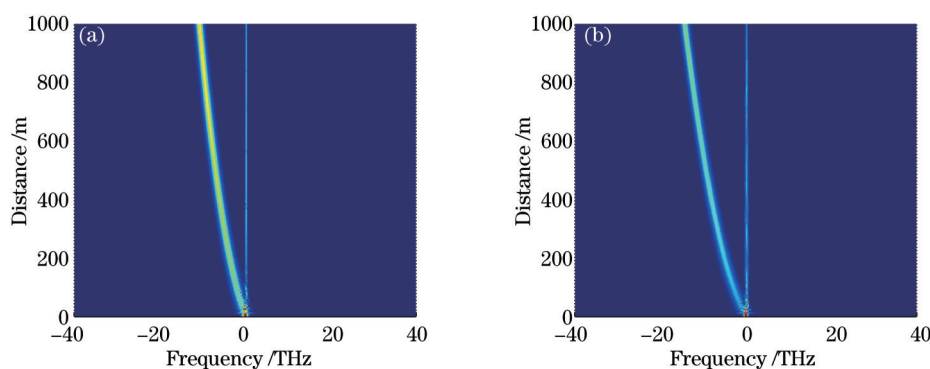


图 5 当  $A_0 = 6 \text{ W}^{0.5}$  时脉冲频谱随传播距离的演化。(a)  $\tau = 200 \text{ fs}$ ; (b)  $\tau = 250 \text{ fs}$

Fig.5 Typical pulse spectral evolution along the propagation distance with  $A_0 = 6 \text{ W}^{0.5}$ . (a)  $\tau = 200 \text{ fs}$ ; (b)  $\tau = 250 \text{ fs}$

不但如此,脉宽较大时,还带来了线性度的恶化。图 6 总结了三种不同脉宽的情况下,频移与峰值功率的关系。可以明显地看出,相比于 150 fs 的情况,200 fs 与 250 fs 时,线性度明显变差。这意味着同样的量化比特 NOB 条件下,前者具有更大的 ENOB。而虽然较宽的脉宽可以产生更大频移,但并不足以提高一个比特位(提高一个比特位意味着频移量翻倍),因此 150 fs 是一个较优的选择。还需要注意到,脉冲能量  $E$  与峰值功率  $P$  和峰值幅度  $A_0$  的关系为:  $E = 2P\tau = 2A_0^2\tau$ ,因此当峰值功率一定时,脉冲能量正比于脉宽。以图 6 中最

高功率 64 W 计算,  $\tau=150, 200, 250$  fs 对应的脉冲能量为 19.2、25.6、32 pJ。如果考虑一个脉冲重复频率为 50 GHz 的系统, 对应的平均功率为 0.96、1.25、1.6 W。而已有的商用光纤放大器, 如掺铒光纤放大器 (EDFA), 超过 1 W 的输出功率已经非常具有挑战性。以上分析表明, 相比于 150 fs, 更宽的脉宽并不能进一步提高量化比特位。相反, 更宽的脉宽会导致量化函数线性度的恶化, 并需要更高的平均输出功率, 增加了系统开销成本。

对于 150 fs 脉宽, 对应的 3 dB 谱宽约为 9.8 nm, 具有该谱宽的脉冲可以比较容易地用现有技术实现。

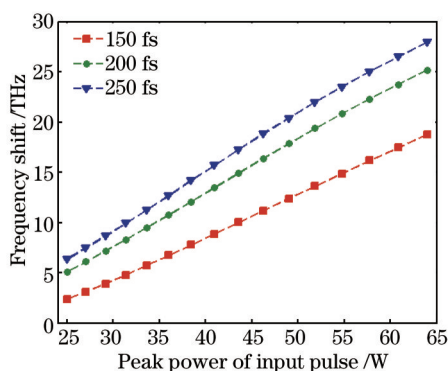


图 6 当脉宽为 150、200、250 fs 时, 频移与输入峰值功率的关系

Fig.6 Frequency shifts with respect to different input peak powers for three input pulse widths of  $\tau=150, 200$  and 250 fs

### 3.2 啁啾的影响

另一个影响 SSFS 效应导致的频移的因素是脉冲的啁啾。在脉冲的放大过程中, 几乎不可避免地会引入一定的啁啾。本节讨论啁啾对频移和量化比特位的影响。由于脉冲经过放大器后, 大多具有负啁啾, 即等效于变换极限脉冲经过一段反常色散光纤后产生的啁啾, 仅考虑负啁啾对系统性能的影响。典型的具有负啁啾的脉冲频谱演化如图 7 所示。考虑了三种情况: 150 fs 变换极限脉冲无啁啾输入 1 km HNLf, 150 fs 脉冲先经过 2 m 普通单模光纤 (SMF) 再经过 HNLf 和先经过 4 m SMF 再经过 HNLf。图 7(a) 给出了不同情况下,

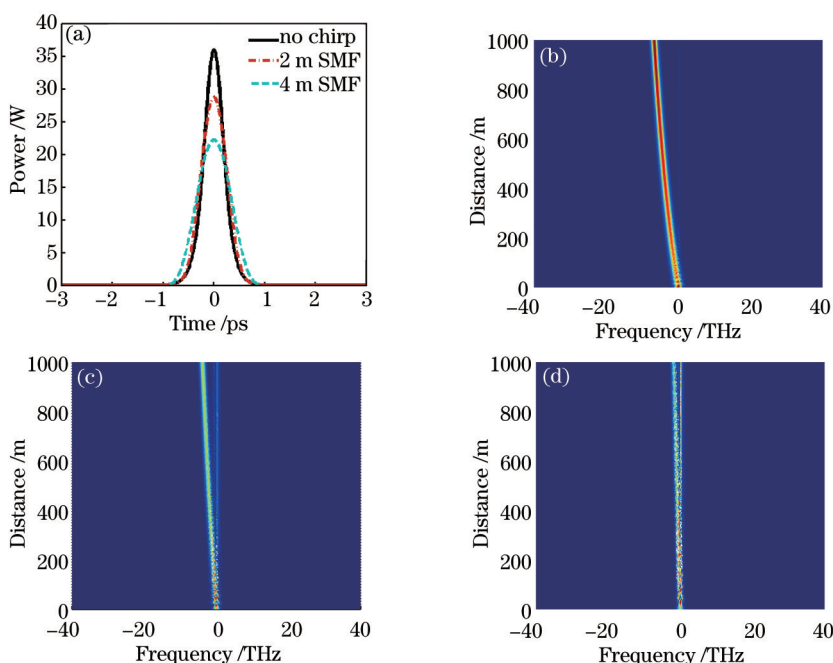


图 7 (a) 存在不同啁啾时的脉冲波形; (b) 无啁啾时的频谱演化; (c) 由 2 m SMF 引入负啁啾时的频谱演化; (d) 由 4 m SMF 引入的负啁啾时的频谱演化。  $\tau=150$  fs,  $A_0=6$  W<sup>0.5</sup>

Fig.7 (a) Pulse profiles with different chirps; (b) spectral evolution without chirp; (c) spectral evolution with chirp induced by 2 m SMF; (d) spectral evolution with chirp induced by 4 m SMF.  $\tau=150$  fs and  $A_0=6$  W<sup>0.5</sup>

脉冲输入 HNLf 时的脉宽。

图 7(b)~(d)给出了相应的频谱演化。可以看到,脉冲啁啾显著降低了频移。不但如此,更多的功率留在了输入频率处,而没有参与频移过程。这意味着量化过程中,对功率的利用效率更低,显然应该避免。图 8 总结了三种负啁啾条件下,频移与峰值功率的关系。此处峰值功率指的是变换极限脉冲的峰值功率,而不是啁啾展宽后的峰值功率。当峰值功率较低时,对于有啁啾的输入脉冲,SSFS 效应导致的频移过小,与原始的输入频率无法区分,因此图 8 中频移低于 2 THz 的部分未予画出。可以看出,当脉冲中有由 2 m SMF 引入的负啁啾时,频移范围缩小到了 11.8 THz,对于 60 GHz 的量化阶,只能支持 7 比特量化。而当脉冲中有由 4 m SMF 引入的负啁啾时,频移范围进一步缩小到 6.6 THz,只能支持 6 比特量化。而且,随着啁啾的引入,频移与峰值功率曲线的线性度显著下降,意味着更差的 ENOB。

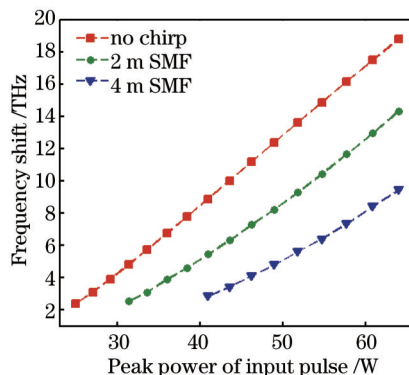


图 8 不同啁啾时频移随输入脉冲峰值功率的变化。τ=150 fs

Fig.8 Frequency shifts with respect to input peak powers for different initial chirp conditions. τ=150 fs

为了降低啁啾的影响,较小的谱宽更有利。但基于之前的分析,若变换极限的输入脉冲具有较大的脉宽,量化函数的线性度会下降,即 ENOB 会降低。而且较大的脉宽导致更大的平均输出功率,增加系统成本。综合考虑,选择 150 fs 作为输入脉冲的脉宽。

### 3.3 高阶色散的影响

仿真中考虑了二阶和三阶色散,更高阶的色散如四阶、五阶色散的影响可以通过仿真来研究。由于文献 [20]中并未给 HNLf 的四阶和五阶色散值,采用 HNLf 的典型色散值 $\beta_4=-9.52 \text{ ps}^4/\text{km}$ , $\beta_5=2.07 \times 10^{-7} \text{ ps}^5/\text{km}^{[25]}$ 。仿真结果如图 9 所示(使用参数 $A_0=6\text{W}^{0.5}$ , $\tau=150 \text{ fs}$ )。

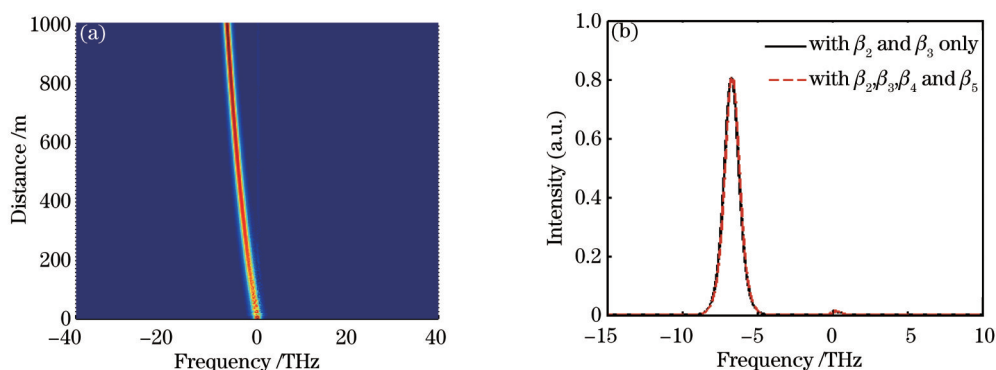


图 9 (a)考虑四阶和五阶色散时的频谱演化;(b)存在和不存在四阶、五阶色散时的输出频谱

Fig.9 (a) Spectral evolution when 4 and 5 order dispersions are considered; (b) output spectra with and without 4 and 5 dispersions

图 9(a)描述了当考虑四阶和五阶色散时,中心频率随传播距离的变化。图 9(b)图描述了中心频率在传播距离 1 km 时的频谱。作为对比,同时给出了只考虑二阶、三阶色散和考虑四阶、五阶色散时的频谱。可以发现,频谱几乎没有变化,因此可以得出结论,更高阶色散对系统的影响可以忽略,只考虑二阶、三阶色散就能较准确地描述系统特性。

### 3.4 脉宽的最优选择

根据以上分析,选择 $\tau=150$  fs作为量化系统输入脉冲的宽度。这个选择具有以下优点:1)大部分的频谱功率参与了由SSFS效应导致的频移,所以量化过程中,频谱功率的利用效率高;2)当输入脉冲峰值功率最大64 W时,频移范围达到16 THz,恰好能够支持8比特的量化,量化阶为60 GHz;3)相比于更高脉宽的情况,量化函数具有更好的线性度,可以实现 $\text{ENOB}=7.02$ ;4)对于重复频率为50 GHz的输入脉冲序列,最高的平均功率为0.96 W,可以较容易地用现有的光学技术得到;5)对应的谱宽为9.8 nm,也可以较容易地用现有的光学技术得到。当然,脉冲中的啁啾必须得到补偿,否则会降低系统的量化比特位。

## 4 结 论

探讨了利用孤子自频移SSFS效应实现高比特全光量化的可行性。对于最优化的输入脉冲脉宽选择 $\tau=150$  fs,可以实现8比特的量化,有效比特位可以达到7.02。所需的谱宽9.8 nm和平均功率0.96 W(50 GHz脉冲重复频率下)也能够较容易地用现有光学技术实现。在峰值功率范围不变的情况下,减小脉宽会导致量化位数NOB的减小,而增加脉宽会导致量化精度的下降,即ENOB的减小。脉冲中的啁啾应该尽可能地得到补偿,仿真结果表明,只要脉冲中存在由2 m普通单模光纤引入的啁啾,量化位数就会降到7。通过合理选择系统参数,基于SSFS效应的全光量化系统确实可以实现高量化比特。

### 参 考 文 献

- 1 B Wu, S Fu, J Wu, *et al.*. 40 Gb/s multifunction optical format conversion module with wavelength multicast capability using nondegenerate four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27 (20): 4446-4454.
- 2 J Ye, L Yan, A Li, *et al.*. Performance improvement of double-sideband signals in radio-over-fiber links utilizing pre-distortion method [J]. *Opt Express*, 2014, 22 (3): 2185-2192.
- 3 J H Wong, H Q Lam, S Aditya, *et al.*. Photonic generation of tunable continuous-wave microwave signals using a temporally-stretched and chirped pulse-train [J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30 (9): 1269-1277.
- 4 J Zhou, S Fu, P P Shum, *et al.*. Photonic measurement of microwave frequency based on phase modulation [J]. *Opt Express*, 2009, 17 (9): 7217-7221.
- 5 J Zhou, S Fu, F Luan, *et al.*. Tunable multi-tap bandpass microwave photonic filter using a windowed Fabry-Perot filter-based multi-wavelength tunable laser [J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29 (22): 3381-3386.
- 6 J Zhou, S Fu, S Aditya, *et al.*. Instantaneous microwave frequency measurement using photonic technique [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21 (15): 1069-1071.
- 7 Dingkan Tang, Jianguo Zhang, Yuanshan Liu, *et al.*. Ultrashort optical pulse monitoring using asynchronous optical sampling technique in highly nonlinear fiber [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8 (7): 630-633.
- 8 Hang Ye, Hongwei Chen, Chao Tang, *et al.*. All-optical sampling OFDM system performance analysis [J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9 (1): 010603.
- 9 Hai Yu, Hongwei Chen, Minghua Chen, *et al.*. Power distribution analysis for multiple modulation formats in an all-optical sampling wavelength division multiplexing system [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11 (10): 100604.
- 10 Lin Zuo, Lihui Feng, Aiying Yang, *et al.*. Experimental investigation on bit-rate-adaptive software synchronous optical sampling [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11 (5): 050603.
- 11 Lin Zuo, Aiying Yang, Junsen Lai, *et al.*. Experimental investigation on a software synchronous optical sampling technique based on periodically poled lithium niobate [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10 (10): 100701.
- 12 G C Valley. Photonic analog-to-digital converters [J]. *Opt Express*, 2007, 15 (5): 1955-1982.
- 13 A Khilo, S J Spector, M E Grein, *et al.*. Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter [J]. *Opt Express*, 2012, 20 (4): 4454-4469.
- 14 K Wu, J H Wong, P Shum, *et al.*. Timing-jitter reduction of passively mode-locked fiber laser with a carbon nanotube saturable absorber by optimization of cavity loss [J]. *Opt Lett*, 2010, 35 (7): 1085-1087.
- 15 K Wu, J H Wong, P Shum, *et al.*. Nonlinear coupling of relative intensity noise from pump to a fiber ring laser mode-locked with carbon nanotubes [J]. *Opt Express*, 2010, 18(16): 16663-16670.

- 16 K Wu, P P Shum, S Aditya, *et al.*. Noise conversion from pump to the passively mode-locked fiber lasers at 1.5  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt Lett*, 2012, 37 (11): 1901-1903.
- 17 K Wu, P Shum, S Aditya, *et al.*. Characterization of the excess noise conversion from optical relative intensity noise in the photodetection of mode-locked lasers for microwave signal synthesis [J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29 (24): 3622-3631.
- 18 K Wu, C Ouyang, J H Wong, *et al.*. Frequency response of the noise conversion from relative intensity noise to phase noise in the photodetection of an optical pulse train [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23 (8): 468-470.
- 19 K Jiang, S Fu, P Shum, *et al.*. A wavelength-switchable passively harmonically mode-locked fiber laser with low pumping threshold using single-walled carbon nanotubes [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22 (11): 754-756.
- 20 K Takahashi, H Matsui, T Nagashima, *et al.*. Resolution upgrade toward 6-bit optical quantization using power-to-wavelength conversion for photonic analog-to-digital conversion [J]. *Opt Lett*, 2013, 38 (22): 4864-4867.
- 21 T Satoh, T Nagashima, K Itoh, *et al.*. Power-saving approach toward 7-bit optical quantization for photonic analog-to-digital conversion [C]. *Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*, 2013.
- 22 T Konishi, K Tanimura, K Asano, *et al.*. All-optical analog-to-digital converter by use of self-frequency shifting in fiber and a pulse-shaping technique [J]. *JOSA B*, 2002, 19 (11): 2817-2823.
- 23 S-i Oda, S-i Okamoto, A Maruta. A novel quantization scheme by slicing supercontinuum spectrum for all-optical analog-to-digital conversion [J]. *Photon Technol Lett*, 2005, 17(2): 465-467.
- 24 G P Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M], New York: Academic Press, 2001.
- 25 J M Dudley, G Genty, S Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78 (4): 1135-1184.

栏目编辑: 刘丰瑞