

文章编号: 0258-7025(2009)06-1454-05

# 基于双路采样非相干叠加的微波信号光量化技术

傅 鑫 张洪明 姚敏玉

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要** 改进了现有的基于强度调制型移相的微波光量化方案, 新方案简化了系统结构, 不再需要互补输出的强度调制器, 显著提高了工作带宽, 并进行了实验验证。新方案采用双路强度调制进行采样, 通过调节 2 个可调光衰减器, 对 2 路采样信号进行非相干叠加来实现系统中传输特性曲线的相移。实验演示了 8 通道(16 个量化等级)的移相光量化系统, 用 20 GHz 重复频率的光脉冲对 2.5 GHz 的正弦信号进行量化, 从量化值可以得到较好的正弦拟合曲线, 证明了方案的可行性。

**关键词** 激光技术; 光量化; 强度调制; 脉冲采样

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1454

## Optical Quantization Technique for Microwave Signal Based on Double Channel Sampling

Fu Xin Zhang Hongming Yao Minyu

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** An improved scheme of intensity-modulating optical quantization technique for microwave signal is proposed and demonstrated by using double channel sampling. This scheme reduces the complexity and dramatically improves the operation bandwidth by eliminating the need of dual complementary-output intensity modulator. In an experimental demonstration, 8-channel outputs of optical quantization system for microwave signal are obtained with quantization levels of 16. A sinusoidal microwave signal of 2.5 GHz is quantized using pulse sequence with repetition rate of 20 GHz. Good fit sinusoidal curve can be obtained from the quantization values, which proves the feasibility of the proposed scheme.

**Key words** laser technique; photonic quantization; intensity modulation; pulsed sampling

### 1 引 言

自 20 世纪 70 年代以来, 在微波技术中引入光子技术, 因其便捷的复用技术、超低的时间抖动<sup>[1~3]</sup>、超快的处理速度等优点引起了微波技术的新突破, 并诞生了一门新的学科分支——微波光子学。其中利用光子技术实现微波信号的模数转换, 也引起了研究人员的广泛关注<sup>[4~6]</sup>。利用光子技术进行模数转换的目的, 旨在将一个连续的微波信号转换成一系列并行的数字信号, 并行数位越多, 表明模数转换精度越高, 或者说量化噪声越小。到目前为止, 其技术方案主要分为光采样电量化方案<sup>[7~9]</sup>

和光采样光量化方案<sup>[10~17]</sup>。在光采样电量化方案中, 采样是在光域完成的, 而量化是在电域完成的, 电域处理的速度极大地限制了这种量化方案的实时处理速率。而在光采样光量化方案中, 待测信号的采样、量化甚至编码都是在光域完成的, 因此系统的工作带宽只受限于调制器和光探测器的工作带宽, 可以实现极高带宽( $\geq 40$  GHz)微波信号的模数转换工作。J. Stigwall 等<sup>[13,14]</sup>在 2005 年提出了移相光量化法, 并以空间光干涉的方法实现了对 1.25 GHz 正弦信号 40 GS/s, 16 个量化等级的并行模数转换。此外, 基于偏振光干涉<sup>[15]</sup>以及多波长色

**收稿日期**: 2008-09-22; **收到修改稿日期**: 2008-12-18

**基金项目**: 国家自然科学基金(60607008)和国家 863 计划(2007AA01Z271)资助课题。

**作者简介**: 傅 鑫(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事全光信号处理、光模数转换等方面的研究。

E-mail: fux05@mails.tsinghua.edu.cn

**导师简介**: 姚敏玉(1946—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事高速光通信及全光信号处理等方面的研究。

E-mail: yaomy@ee.tsinghua.edu.cn

散<sup>[16]</sup>的移相光量化方案也分别对 2.2 GHz 和 2.5 GHz 的正弦信号进行了 16 个量化等级的模数转换。这些方案都使用了相位调制器,因而 2 个正交偏振脉冲之间的走离以及相位调制器的温漂就成为影响量化精度的主要因素。此外,上述方案中所采用的传输特性曲线只能引入精细度较低的固定相移,不利于扩展更多的并行通道,从而制约了并行编码的并行位数。强度调制型的移相光量化方案<sup>[17]</sup>解决了相位调制型移相光量化法的上述问题,但是需要使用带有互补输出的强度调制器,而互补输出的强度调制器的工作带宽相对较窄,无法发挥光采样光量化系统在工作带宽方面的优势,大大制约了该方案的应用范围。本文对强度调制型移相光量化方案进行了改进,采用商用的单输出强度调制器代替了互补输出的强度调制器,不仅降低了系统实现的复杂度,而且大大扩展了系统的工作带宽(商用单输出强度调制器工作带宽可以超过 40 GHz),充分体现了光量化的优势。此外,还从实验上验证了以脉冲采样来实现移相光量化的可行性。

## 2 方案及其工作原理

移相光量化的基本思想为,利用光的外调制技术将微波信号调制到一个光脉冲序列上,从而完成

采样;将这个采样序列通过  $N$  个并行通道,这些通道的传输特性曲线是一组周期相同且具有等间隔相移的正弦曲线,这样的  $N$  个通道在同一时刻输出的光采样脉冲具有不同的大小,再经过光探测器和电比较器就可以实现待测信号的量化和编码<sup>[13,14]</sup>。图 1 显示了  $N=4$  的移相光量化系统是如何将输入的正弦信号(a)转换成 4 个通道的光输出信号(c),并经过阈值判决变成对应的量化编码(d)和量化值(e)的。在移相光量化系统中, $N$  个通道的传输特性曲线与待测信号  $V(t)$  之间的关系需要满足

$$I_{\text{out}}^i = I_{\text{th}} + I_0 \cos\left[\pi \frac{V(t)}{V_\pi} + \theta_i\right], \quad (1)$$

式中  $I_{\text{out}}^i$ ,  $I_{\text{th}}$  和  $I_0$  分别为第  $i$  路的输出总功率、判决阈值以及调制项的光强,  $V_\pi$  为调制器的半波电压,  $V(t)$  为待量化的信号,  $\theta_i$  为第  $i$  条传输特性曲线的固有相移,并且

$$\theta_i = (i-1) \cdot \frac{\pi}{N}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

移相光量化系统的作用就是产生如(1)式所示的  $N$  条传输曲线,它的  $N$  路输出经过阈值判决后就可以得到  $2N$  个不同的量化编码,分别对应于  $2N$  个不同的电压等级,因而可以对  $(0, 2V_\pi)$  范围内的电压实现  $2N$  个量化等级的模数转换。

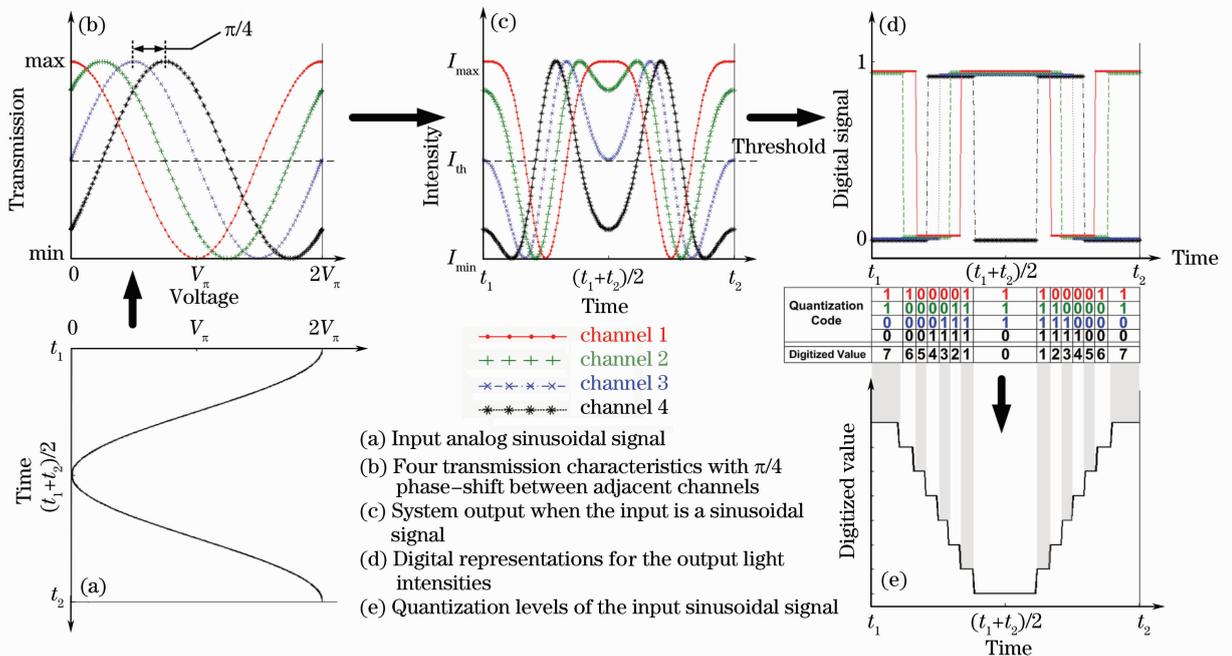


图 1 移相量化的模拟

Fig. 1 Simulation of phase-shifted quantization

提出的强度调制型移相光量化方案如图 2 所示,图中 IM 为强度调制器,OCM 为光耦合模块,

PD 为光探测器,EC 为电比较器。采样光脉冲经过 1:2 的光耦合器分别进入并行放置的 2 个铌酸锂

(LiNbO<sub>3</sub>)强度调制器[分别偏置在 $(N-1) \cdot \pi/N$ 和0],待转换的微波信号加于调制器的调制端,这样就完成了2路基于同一光脉冲序列的光采样;采样后的2路光脉冲序列经过一个具有 $N$ 个通道的光耦合模块,每个通道具有移相光量化所需要的相移输出特性曲线,2路光脉冲序列分别在各个通道中进行非相干叠加,输出不同的幅度;最后经光电转换和阈值判

决就可以产生量化的并行编码输出。光耦合模块的内部结构如图3所示,它是由偏振控制器(PC)、衰减器(Att.)和偏振合束器(PBC)组成的,它的每路输出都是由一部分IM-A的输出和一部分IM-B的输出经非相干叠加而产生的。通过适当地控制2个并行光路中的衰减( $\gamma_1$ 和 $\gamma_2$ ),就可以实现第 $i$ 路传输特性曲线所需要的固定相移 $\theta_i = (i-1) \cdot (\pi/N)$ 。

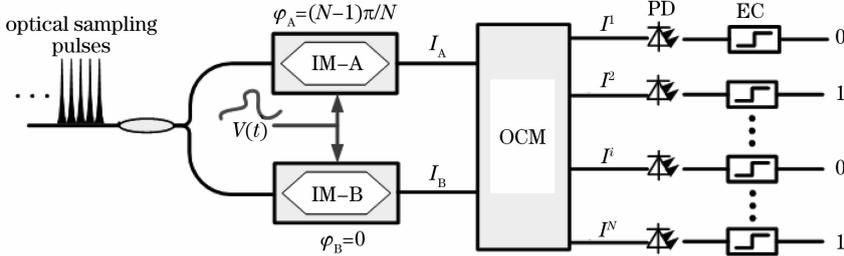


图2  $N$ 通道移相量化系统整体示意图

Fig. 2 Block diagram of  $N$ -channel phase-shifted quantization system

由上可知,强度调制器IM-A和IM-B的输出分别为

$$I_A = I_M \left\{ 1 + \cos \left[ \xi + \frac{(N-1)\pi}{N} \right] \right\}, \quad (3)$$

$$I_B = I_M (1 + \cos \xi).$$

式中 $I_M$ 为调制器的最大输出光强的一半, $\xi = \pi \frac{V(t)}{V_\pi}$ 为待测信号 $V(t)$ 所引入的传输特性曲线相移。由图3可知,光耦合模块的第 $i$ 路输出 $I^i$ 是 $I_A$ 和 $I_B$ 的线性叠加

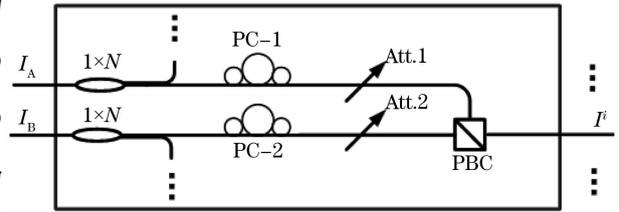


图3 光耦合模块部分内部结构

Fig. 3 Partial inner structure of optical coupling module

$$I^i = \gamma_1 \cdot \frac{I_A}{N} + \gamma_2 \cdot \frac{I_B}{N} = \frac{I_M}{N} (\gamma_1 + \gamma_2) + \frac{\gamma_1 I_M}{N} \left[ \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \cos \xi + \cos \left( \xi + \frac{N-1}{N} \cdot \pi \right) \right], \quad (5)$$

式中 $\gamma_1$ 和 $\gamma_2$ 分别表示图3中的光衰减器Att.1和Att.2对采样信号的衰减。为了获得如(1)式所示的第 $i$ 路传输特性曲线,调节第 $i$ 路的偏振合束器之前的衰减器Att.1和Att.2,使得

$$\frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \sin \left( i \cdot \frac{\pi}{N} \right) / \sin \left[ (i-1) \cdot \frac{\pi}{N} \right],$$

这样,可以从(5)式得到

$$I^i = \frac{I_M}{N} (\gamma_1 + \gamma_2) + \frac{\gamma_1 I_M}{N} \left\{ \frac{\sin [i \cdot (\pi/N)]}{\sin [(i-1) \cdot (\pi/N)]} \cdot \cos \xi + \cos \left( \xi + \frac{N-1}{N} \cdot \pi \right) \right\} = \frac{I_M}{N} (\gamma_1 + \gamma_2) + \frac{\gamma_1 I_M}{N} \frac{\sin (\pi/N)}{\sin \theta^i} \cdot \cos (\xi + \theta^i). \quad (6)$$

对比(1)式和(6)式可知,通过将偏置在 $(N-1) \cdot \pi/N$ 和0的强度调制器的输出进行加权的非相干叠加,就可以实现移相光量化系统所要求的 $N$ 条传输特性曲线。其中,不同通道的固定相移是通过对2个强度调制器的输出进行加权叠加得到的。

### 3 实验结果及讨论

为了验证该方案的可行性,进行了如图4所示的

8通道验证性实验,其中PC为偏振控制器,Amp为微波放大器,PS为微波移相器,Att.为微波衰减器,OC为光耦合器,IM为强度调制器,VOA为可调光衰减器,PBC为偏振合束器,PD为光探测器,DSO为数字采样示波器。2个强度调制器分别偏置在 $7\pi/8$ 和0,在其上加上2.5 GHz的微波信号,采样信号同时在2个强度调制器上进行采样,各自通过一个可调衰减器(VOA-1或VOA-2),然后在偏振合束

器上叠加,就产生了所需要的传输特性曲线。调节衰减器 1 和 2,使其分别等于表 1 中所示的比值(表 1 中的  $\infty$  和 0 分别对应于  $\gamma_1=0$  和  $\gamma_2=0$ ),即可得到 8 个通道的量化曲线,记录下的 8 条量化曲线都显示在图 5(b)上,与图 5(a)数值模拟得到的结果吻合较好。使用 20 GHz 重复频率的光脉冲代替图 4 中的直流光源,就可以得到脉冲采样的结果,图 5(c)对比显示了第 5 路(共有 8 路)的直流光的量化结果和光脉冲的

量化结果。可以看到,光脉冲量化结果的顶部和直流光的量化曲线吻合得很好。通过对记录下的脉冲串进行手工阈值判决,就可以得到各个脉冲处所对应的待测电压的量化值,如图 5(d)中的点所示,而图 5(d)中的虚线是对信号的量化值进行单周期正弦拟合得到的曲线。由图 5(d)可以看出,实验对 2.5 GHz 微波信号的量化结果可以拟合出很好的 2.5 GHz 的正弦曲线,从而证明了该方案的可行性。

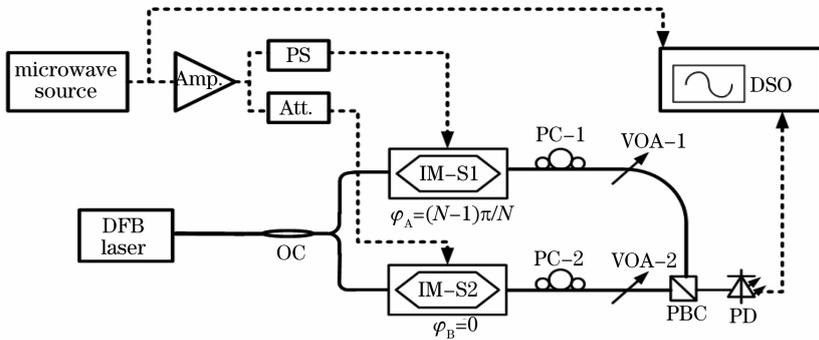


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental setup

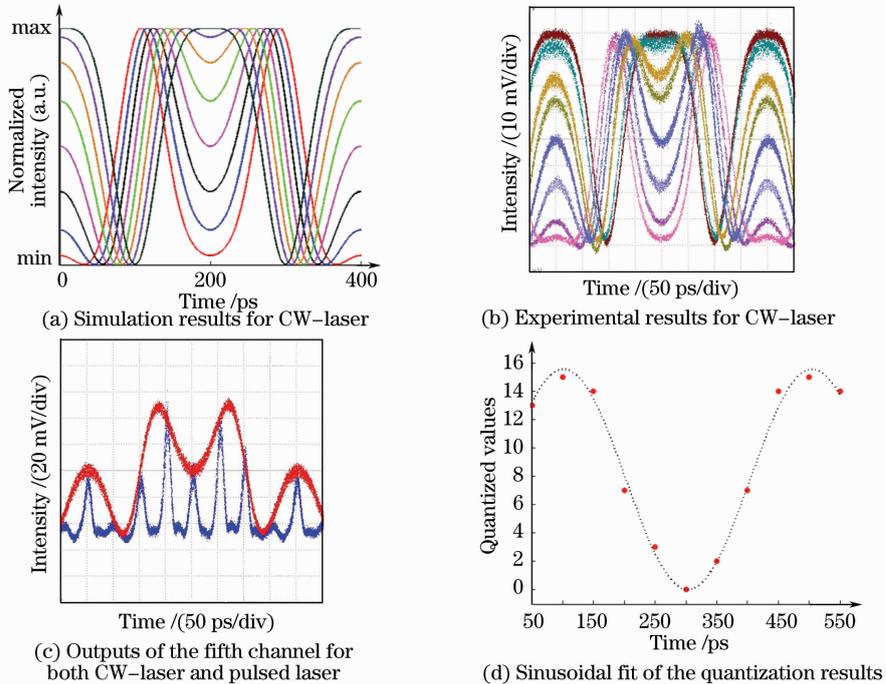


图 5 移相量化实验结果及后续处理

Fig. 5 Experimental results and post-processing of phase-shifted quantization

表 1 两个可调衰减器衰减的比值

Table 1 Ratio of two tunable optical attenuators

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8
$\gamma_2/\gamma_1$	$\infty$	1.8478	1.3066	1.0824	0.9239	0.7654	0.5412	0

## 4 结 论

对现有的强度调制型移相光量化方案进行了 2 方面的改进:1)不再使用互补输出的强度调制器,改善了系统的工作带宽特性,充分体现了移相光量化系统在工作带宽的优势;2)使用光脉冲完成采样,从实验上验证在该方案使用超高速率光脉冲进行采样的可行性。与相位调制型移相光量化方案相比,该方案可以提供高精度且控制简单的移相方法,扩展性很好。此外,强度调制器的温漂远小于相位调制器,且不存在不同偏振态脉冲之间的走离问题。综上所述,该方案的工作带宽只受限于当前的商用强度调制器,而采样速率只受限于采样脉冲的重复频率,因而有可能应用在对极高频的微波信号,以极高的采样率进行量化的微波模数转换系统中。

## 参 考 文 献

- Peng Can, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. 10 GHz actively mode-locked fiber ring laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 101~104  
彭 璨,姚敏玉,张洪明等. 10 GHz 主动锁模激光器 [J]. 中国激光, 2003, **30**(2): 101~104
- Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun *et al.*. Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 163~165  
王 旌,张洪明,张 隰等. 基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器 [J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 163~165
- Wang Hua, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. Multi-wavelength fiber ring laser with semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1502~1506  
王 华,姚敏玉,张洪明等. 采用半导体光放大器的多波长光纤环形激光器 [J]. 中国激光, 2007, **34**(11): 1502~1506
- R. H. Walden. Analog-to-digital converter survey and analysis [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 1999, **17**(4): 539~550
- G. C. Valley. Photonic analog-to-digital converters [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5): 1955~1982
- Michael E. Manka. Microwave photonics for electronic warfare applications[C]. *Microwave Photonics*, 2008. 275~278
- P. W. Juodawlkis, J. C. Twichell, G. E. Betts *et al.*. Optically sampled analog-to-digital converters[J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.*, 2001, **49**(10): 1840~1853
- Y. Han, B. Jalali. Time-bandwidth product of the photonic time-stretched analog-to-digital converter [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.*, 2003, **51**(7): 1886~1892
- Zhang Hongming, Yao Minyu, Zhang Jianfeng *et al.*. Optical A/D conversion by time-interweaved sampling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(12): 1096~1098  
张洪明,姚敏玉,张剑锋等. 光时分抽样 A/D 转换 [J]. 中国激光, 2001, **A28**(12): 1096~1098
- H. F. Taylor. An optical analog-to-digital converter-design and analysis [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **QE-15**(4): 210~216
- Scho-ichiro Oda, Akihiro Maruta. A novel quantization scheme by slicing supercontinuum spectrum for all-optical analog-to-digital conversion[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 465~467
- Chris Xu, Xiang Liu. Photonic analog-to-digital converter using soliton self-frequency shift and interleaving spectral filters[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(12): 986~988
- J. Stigwall, S. Galt. Interferometric analog-to-digital conversion scheme[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 468~470
- J. Stigwall, S. Galt. Demonstration and analysis of a 40 gigasample/s interferometric analog-to-digital conversion [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(3): 1247~1256
- Wangzhe Li, Hongming Zhang, Qingwei Wu *et al.*. All-optical analog-to-digital conversion based on polarization-differential interference and phase modulation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(8): 625~627
- Qingwei Wu, Minyu Yao, Hongming Zhang *et al.*. All-optical analog-to-digital conversion using inherent multiwavelength phase shift in LiNbO<sub>3</sub> phase modulator[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(12): 1036~1038
- Zhang Zhuangqian, Zhang Hongming, Fu Xin *et al.*. A new approach for analog to digital conversion based on double parallel optical intensity modulator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 378~382  
章壮前,张洪明,傅 鑫等. 一种采用并行光强度调制器的模数转换方法[J]. 中国激光, 2008, **35**(3): 378~382