

文章编号 : 0258-7025(2001)12-1096-03

光时分抽样 A/D 转换 *

张洪明 姚敏玉 张剑峰 高以智

(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 报道了一种应用于高速光 A/D 转换的时分抽样方法,利用这一方法实现 16×2.5 GHz 抽样率对 2.5 GHz 微波周期信号的抽样测量。分析了抽样误差的主要原因和减少误差的方法,并针对调制器的调制非线性修正抽样结果,得到的抽样信噪比为 29 dB。

关键词 光 A/D 转换 时分抽样 时分复用

中图分类号 TN 911.74 ; TP 335 文献标识码 A

Optical A/D Conversion by Time-interweaved Sampling

ZHANG Hong-ming YAO Min-yu ZHANG Jian-feng GAO Yi-zhi

(*Electronic Engineering Department , Tsinghua University , Beijing 100084*)

Abstract A time-interweaved sampling scheme for optical A/D conversion is proposed, and 16×2.5 GHz sampling rate to microwave signal was realized. The sampling errors are analysed and the methods to improve sampling precision are discussed. The experiment result was revised and SNR is about 29 dB.

Key words optical A/D conversion , time-interweaved sampling , OTDM

利用光信号处理技术降低微波信号的速率,再由电子 A/D 转换器件进行 A/D 转换,是近年来刚兴起的高速 A/D 转换手段。目前国际上已报道的光 A/D 转换主要有以下两类方案:光波分抽样^[1-3]不同波长的光脉冲串通过适当时延复用后形成高速脉冲序列对待测信号进行抽样,然后利用波分复用器解复用后再进行并行处理,电子 A/D 转换器所需处理的频率为取样频率的 N 分之一(其中 N 为波长数)。这类方案由于需要多个不同波长且要求脉冲质量一致的光源,使得系统和实验装置较为复杂,实现难度较大;光时域展宽方案^[4,5]为利用光纤中的群速度色散作用,使调制在具有线性啁啾特性的光脉冲上的微波信号在脉冲因色散作用被展宽的同时也被展宽,从而实现降低信号带宽的目的。这一方案中,对系统线性要求较高,同时可测量的微波信号时间段长度和展宽系数是相互制约的,使得其无法对较长时间段微波信号较大幅度地降低速率。根据光时分复用(OTDM)的思想,本文提出时分抽样的方案,其优点是只需一个光源,用 OTDM

解复用的方法使后续电子 A/D 转换器件的处理速度得以降低,系统结构比较简单。

1 时分抽样原理

光时分复用抽样方案是通过将单一波长的超短光脉冲在时域上复用形成高速光脉冲序列,然后用高速(复用)光脉冲序列实现对高速微波信号的抽样,原理框图如图 1 所示。由脉冲光源产生重复频率为 f 的超短光脉冲,通过 OTDM 复用得到频率为

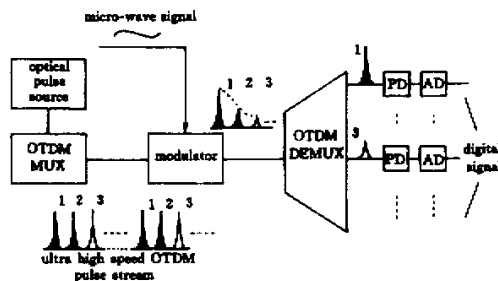


图 1 应用光时分复用技术的时分抽样方案

Fig.1 Time-interweaved optical sampling schematics

(PD : photo detector)

* 国家自然科学基金(No. 60077001)资助项目。

$N \times f$ 的超高速抽样脉冲串, 该抽样光脉冲串经过被待测微波信号调制的铌酸锂光强调制器, 对待测微波信号抽样, 抽样结果由 OTDM 解复用器恢复成 N 路频率为 f 的抽样脉冲序列, 分别经光探测器 (PD) 后由较低速率的电子 A/D 转换器分别转换得到 N 路并行数字信号, 通过后续的存贮和并行处理, 得到待测微波信号的数字转换结果。图中, 脉冲 1, 2, 3 表示时分复用的不同信道的脉冲。

2 实验装置

为了验证光时分复用 A/D 转换方案的可行性, 我们进行了 2.5 GHz 光时分复用取样的原理实验。针对待抽样微波信号为 2.5 GHz 正弦周期信号的特点, 设计了如图 2 所示的实验装置, 对上述时分复用方案作了一定的简化。实验中只用了单路 2.5 GHz 光抽样脉冲串, 通过两个串联的机械式微波调

相器调节微波信号的附加相移, 使 2.5 GHz 抽样光脉冲对正弦微波信号每个周期内等间隔抽样 16 次 (即相邻两个抽样点的时间间隔为 25 ps), 处理数据时将 16 次的抽样结果叠加起来, 以模拟 16×2.5 GHz 时分抽样结果。

实验中所用的光脉冲源为增益开关 DFB 半导体激光器 (GS-DFB), 输出脉宽为 ~ 20 ps, 2.5 GHz 光脉冲串, 经过 1 km DCF (色散补偿光纤, $D = 90$ ps/km·nm) 线性压缩后, 脉宽约为 12 ps, 再由梳状色散渐减光纤链进行高阶非线性压缩可获得 3~5 ps 的超短光脉冲串, 获得的超短光脉冲宽度与注入梳状光纤链的脉冲能量有关 (可通过掺铒光纤放大器抽运光强来控制)。超短光脉冲串经 LiNbO₃ 强度调制器受到待测正弦微波信号调制。通过手动调节移相器并在 50 GHz 取样示波器 (TEK11801C) 上观察抽样脉冲的相移来保证在待测微波信号周期内等间隔抽样 16 次。最后在示波器上读出抽样结果。

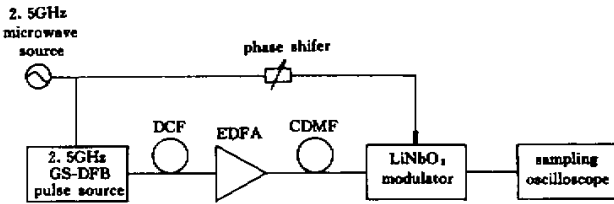


图 2 光时分抽样实验装置图

Fig. 2 Experiment setup of time-interweaved optical sampling

3 实验结果与讨论

图 3 为每周期 16 次等间隔抽样叠加后的结果。考虑到 LiNbO₃ 调制器对抽样脉冲调制的非线性, 对图 3 结果作了反余弦修正, 所得结果如图 4。

对图 4 所示修正后的 16 次抽样叠加结果 (40G samples per second) 进行离散傅里叶变换 (DFT), 去

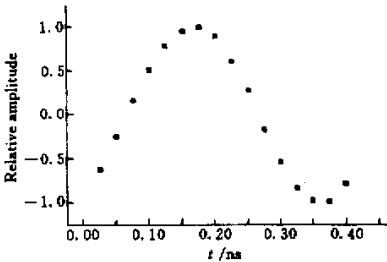


图 3 16 路抽样结果叠加
Fig. 3 16 channel samples

除直流分量后求得的抽样结果功率谱见图 5。可见, 其功率谱主要为基频 (2.5 GHz) 分量。基频与其余高阶频率分量功率总和的比约为 825 倍 (即信噪比约为 29 dB)。

如果设 A/D 转换的量化误差为 $\Delta V/2$, 即 ΔV

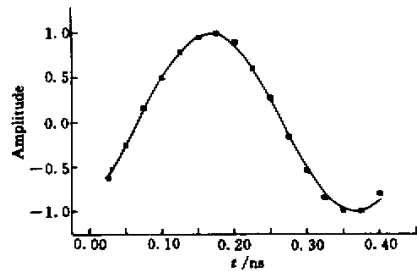


图 4 ■ 为图 3 数据修正并归一化后的结果, — 为 2.5 GHz 标准正弦曲线

Fig. 4 ■ Revised and normalized samples, — 2.5 GHz standard sinusoid

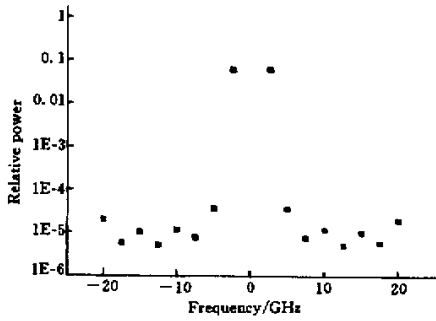


图 5 抽样修正后的功率谱

Fig. 5 Power-spectrum of the revised samples

$= 2V_m/2^N$ (其中 V_m 为待测微波信号振幅, N 为 A/D 转换比特位数)。则要求抽样结果的误差 $|\delta V| < \Delta V/2 = V_m/2^N$ 。在本抽样结果中, $|\delta V|$ 由各高阶频率分量幅度组成。

$|\delta V| = \sqrt{\delta V_2^2 + \delta V_3^2 + \delta V_4^2 + \dots}$, 其中 δV_n 为 n 阶频率分量振幅。

则要求 $P_m/\delta P > 2^{2N}$, 即要使基频功率与其余高次频率功率之和的比大于 2^{2N} , 当 N 为 4 时, 这一结果为 24 dB, N 为 5 时为 30 dB。所以本实验中的抽样精度能够达到 4 bit, 接近 5 bit 的精度要求。

影响实验精度的主要因素有抽样脉冲宽度和脉冲抖动。脉宽对抽样的影响主要表现在, 由于微波信号的动态调制, 使得对单个脉冲顶部的调制不均匀, 导致脉冲变形, 如图 6 所示。在未对增益开关 DFB 输出光脉冲做任何压缩的情况下 (即脉宽为 ~ 20 ps), 实验中观测到的脉冲在调制深度较大时 (在正弦波调制下沿), 脉冲底部拖尾引起脉冲明显变形, 图 7 为实验中观测到的调制前抽样脉冲与变形脉冲波形。采用高阶压缩的方法将脉宽压缩至 5 ps 左右, 脉冲变形明显减小。

脉冲的幅度抖动和时间抖动直接影响抽样结果, 是抽样测量的另一主要误差来源, 时间抖动

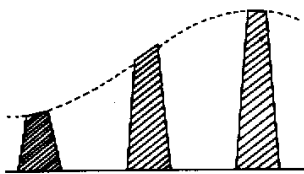


图 6 脉冲顶部调制不均匀, 虚线为调制信号波形

Fig. 6 Distorted pulse shape after modulation
Dashed is the modulating signal waveform

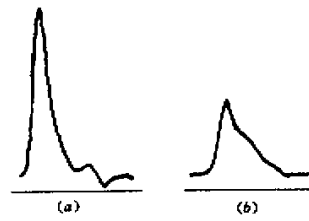


图 7 脉宽未经压缩

(a) 正常脉冲形状 (b) 调制深度较大时的变形脉冲

Fig. 7 Pulse shape without compression

(a) normal pulse shape; (b) large scale modulated pulse shape

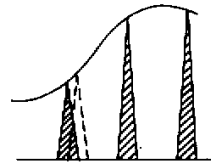


图 8 脉冲时间抖动对抽样精度的影响

虚线为抖动后的脉冲位置

Fig. 8 Sampling accuracy impaired by pulse time jitter

Dashed is jittered pulse position

对抽样精度的影响如图 8 所示。实验所用增益开关 DFB 激光器输出抖动在 5 ps 左右, 采用光自注入法消除抖动后时间抖动可降至 2 ps 以下。本实验中采用示波器求平均的模式减小脉冲幅度和时间抖动对结果的影响, 这一方法对周期信号的测量是可行的, 但对非周期信号的抽样则无法消除抖动的影响。

如果在 LiNbO_3 调制器后级联 EDFA 光放大器, 则光放大器的增益非线性将损坏抽样结果的精度。光源温度、驱动电路不稳引起的脉冲源功率浮动以及示波器读数误差也是影响观测结果的主要因素。

参 考 文 献

- 1 A. Yariv, R. G. M. P. Koumans. Time interleaved optical sampling for ultrahigh speed A/D conversion. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(21) 2012~2013
- 2 Jin U. Kang, Michael Y. Frankel, Ronald D. Esman. Highly parallel pulsed optoelectronic analog-digital converter. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(11):1626~1628
- 3 M. Y. Frankel, Jin U. Kang, R. D. Esman. High-performance photonic analogue-digital converter. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(25) 2096~2097
- 4 F. Coppinger, A. S. Bhushan, B. Jalali. Photonic time stretch and its application to analog-to-digital conversion. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1999, **47**(7):1309~1314
- 5 F. Coppinger, A. S. Bhushan, B. Jalali. Time magnification of electrical signals using chirped optical pulses. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(4) 399~400