

用白噪声源实现高速真随机码

孙建伟,张胜利,王绍伟,谢 亮,祝宁华

(中国科学院半导体研究所,北京 100083)

摘 要: 本文分析了用白噪声产生高速真随机码的基本原理.用 HP346C 宽带白噪声源和二级带有判决电路的 D 触发器,产生了高速非归零真随机码,避免了由亚稳态造成的延时抖动.

关键词: 白噪声; D 触发器; 高速真随机码

中图分类号: TN782 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2003) 08-1255-02

Generation of High-Speed True Random Bit Sequence Using White Noise Source

SUN Jian-wei, ZHANG Sheng-li, WANG Shao-wei, XIE Liang, ZHU Ning-hua

(Institute of semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The principle of generating high-speed true random bit sequence using white noise is discussed. High-speed true random bit sequence was generated using broadband white noise source and high-speed D flip-flops. The jitter caused by the meta-stable state was eliminated.

Key words: white noise; D flip-flop; high-speed true random bit sequence

1 引言

随着数字光通信的发展,对传输比特率的需求越来越高,WDM 系统单信道的速率已达 10Gb/s 并向 40Gb/s 发展^[1].对相应的模块和系统的测试设备(如误码仪和高速示波器)的要求也越来越高,价格也十分昂贵.误码率和眼图是常见的测试手段.误码率测试是对比光发送模块与光接收模块的码序列,对错误的码位记数,从而算出误码率.眼图是通过将系统输出的很多个脉冲波形互相重叠在一起显示而生成的,一般利用高速示波器进行观察.眼图可以反映丰富的信息,如、上升下降时间、抖动、振铃、消光比和 Q 系数等.非归零伪随机码序列是进行上述测试常用的脉冲.因此,产生高速的非归零伪随机码序列在通信测试中具有很重要的作用.

产生伪随机码序列的电路一般用多个 D 触发器和异或门构成^[2].若产生 $2^n - 1$ 位伪随机序列,则至少需要 n 个 D 触发器.此电路在要求的码率较低时很容易实现.然而,当码率达到几个 Gb/s 以上时,要求每个器件达到相应的开关速度,同时要求总的时延很短,这样不但对器件性能的要求很高,而且大大增加了设计难度.

最近,Lepley^[3]等用掺铒光纤放大器与 pin 探测器产生的宽带白噪声做高速 D 触发器的输入,产生了 2.5Gb/s 和 5Gb/s 的非归零真随机码.图 1 是他们产生真随机码的原理图.这种产生随机码的方法简单实用.把它用

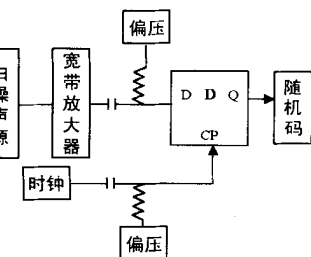


图 1 文献[3]所用随机码发生器

于眼图测试,得到了较好的结果.然而,我们发现,这种方法在原理上有一定缺陷.由于 D 触发器的输入信号为宽带白噪声,一般来说在时钟上升时间之内输入信号总会有变化的可能性,因而在输出端不可避免会出现亚稳态^[4],从而会增加输出随机码的延时抖动.

我们对 Lepley 等提出的方法加以改进,消除了由亚稳态造成的延时抖动,产生了很好的高速非归零真随机码.

2 产生高速真随机码的原理

典型的噪声电压分布概率如图 2 所示,满足高斯正态分布^[5],即

$$p(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(V-V_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

其中 V_0 为电压平均值, σ^2 为方差.若使大于 V_0 的电压对应数字信号“1”,小于 V_0 的电压对应数字信号“0”,则“0”“1”在某时刻出现的概率完全相等.这样的对应关系可用 D 触发器来实现.设 D 触发器的两个判决电压为 $V_1, V_2 (V_2 > V_1)$,当输入电压大于判决电压 V_2 时输出为“1”,小于判决电压 V_1 时输出为“0”,当电压处于 V_1 与 V_2 之间时,判决后的“1”“0”状态是随机的.因为电压分布关于 V_0 对称,因此只要 V_1, V_2 关于 V_0 对称,即 $V_0 = (V_2 + V_1)/2$,则在判决后“0”“1”在某时刻出现的概率相等(见图 2).由于正态分布是噪声电压长时间统计的结果,如果 D 触发器的触发时钟频率很高,则相邻的两个电压可能具有相关性,从而影响到输出码的随机性.若时钟的周期为 T ,则时刻 t 和时刻 $t + T$ 时两个电压的相关性可用相关函数 $R(\tau)$ 来描述

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T V(t) V(t + \tau) dt \quad (2)$$

$R(\tau)$ 与噪声功率谱密度 $s(f)$ 的关系为^[6]

$$R(f) = \int_{-B}^B s(f) e^{j2\pi f t} df \quad (3)$$

其中 f 表示频率. 对带宽为 B 的限带白噪声 (即 $0 < f < B$ 时, $s(f) = A$; $f > B$ 时, $s(f) = 0$), 可以求得

$$R(\tau) = AB \frac{\text{Si}(2\pi B\tau)}{(2\pi B\tau)} \quad (4)$$

当 $B = 1$ 时, $R(\tau) = 0$. 说明当限带白噪声的带宽接近或等于 D 触发器的触发时钟频率时则可得到相关性较小的随机码.

3 实验结果

图 3 是产生随机码的原理图. 噪声源为 HP346C 宽带白噪声源. 图 4 是它的功率谱密度. 可以看出谱密度直到 26.5 GHz 有较好的平坦度. 噪声通过带宽为 3 GHz、增益为 55 dB 的放大器放大后峰峰值约为 0.6 V. 此信号用交流耦合输入至带判决电路的触发器 D1. D1 的翻转速度大于 3 Gb/s. 判决电压 V_1 、 V_2

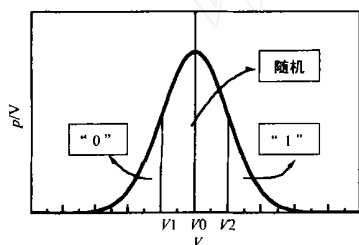


图 2 噪声电压的概率分布与判决电压

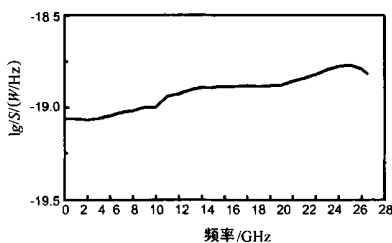


图 3 产生随机码的原理示意图

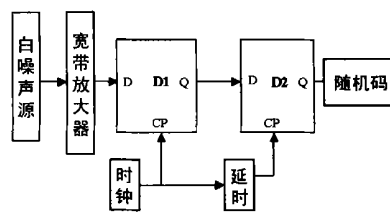


图 4 噪声源的谱密度

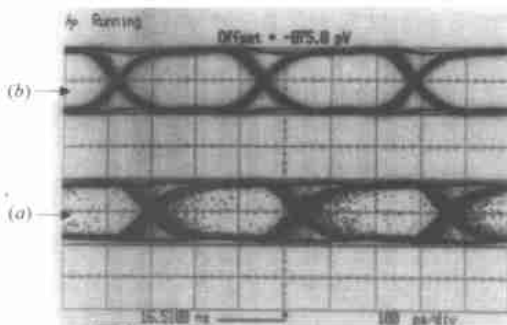


图 5 3 Gb/s 真随机码眼图

光通信在光电收发模块中, 常常要求较宽的响应带宽. 为了测试这一性能, 常用模式长度较长的伪随机码, 如 $2^{31} - 1$ 的伪随机码. 真随机码在理论上有限长的模式长度, 故把它用于系统测试时, 能反映系统的宽带响应特性. 由于商品化的 D 触发器的翻转速率已达 10 Gb/s 以上 (如 NEL 的 NLG4004A, 翻转速率可达 18 Gb/s), 所以这种方法能够用于产生速率大于 10 Gb/s 的高速随机码, 为光通信系统测试提供一条简单实用的新途径.

4 结论

用宽带白噪声源和二级带有判决电路的高速 D 触发器产生了 3 Gb/s 的高速真随机码, 消除了由亚稳态造成的延时抖动. 这种方法可以产生大于 10 Gb/s 的高速真随机码.

参考文献:

- [1] Ludwig R, et al. Enabling transmission at 160 Gbit/s [A]. OFC2002 [C]. California, 2002. 1.

分别为 +0.1V 和 -0.1V. $D1$ 的输出交流耦合至 $D2$, $D2$ 的输出即为真随机码. 实验所用时钟频率为 3 GHz, 故码率为 3 Gb/s. 若用 Lepley 等提出的方法, 即用 $D1$ 的输出作随机码, 则随机码的眼图如图 5(b) 所示. 可以看出, 输出的随机码在状态变化时有很严重的延时抖动. 这是由于触发器 $D1$ 要建立“0”或“1”两个稳态, 其输入端信号必须满足在时钟上升沿到来之前的建立时间及时钟上升沿到来之后的保持时间内保持稳定. 如果不满足这一条件, 则触发器 $D1$ 进入亚稳态, 由“0”变“1”或由“1”变“0”的传输时间增加, 因而出现眼图中的延时抖动. 这是用宽带白噪声做输入信号的必然结果. 为了改进这一缺陷, 我们在 $D1$ 之后增加了触发器 $D2$. $D2$ 的时钟是由 $D1$ 的时钟经过延时得到. 调节延时时间可以使 $D2$ 的状态翻转正好处于 $D1$ 的稳态. 图 5(a) 是 $D2$ 输出的真随机码眼图. 可以看出延时抖动已基本消除, 眼图非常清晰.

- [2] Spencer T W. Pseudo-random bit sequence generator [J]. Electron. world wirel, 1990, 96: 303.
- [3] Lepley J J, et al. High-speed true random bit sequence generator [J]. Electron. Lett., 2000, 36: 1480.
- [4] Dover R W, et al. On Semiconductor Application Note AN1504/D [Z]. 2000.
- [5] Vergers C A. Handbook of electrical noise: measurement and technology [M]. PA: TAB Books, 1987.
- [6] Van der Ziel A. Noise: Source, Characterization, Measurement [M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 1970.

作者简介:



蒲建伟 男, 1971 年生, 山西河曲人, 1995、1998 年先后获兰州大学电子材料与器件工程专业学士、硕士学位, 现为中科院半导体所博士, 研究方向为高速光电器件及收发模块的设计与测试.



张胜利 男, 1976 年生, 河南驻马店人, 1998、2001 年先后获兰州大学半导体器件与微电子学学士、电子材料与器件工程专业硕士学位, 现为中科院半导体所博士, 研究方向为高速光电器件及收发模块的设计与测试.