

一种零中频高斯白噪声添加装置的 FPGA 实现

陆连伟, 宋杰, 罗常青
(广州海格通信集团股份有限公司, 广州 510663)

摘要: 提出了一种基于 FPGA 实现的高斯白噪声添加装置的算法和实现结构。利用易于硬件实现的矩阵变换和异或运算产生均匀分布随机数, 然后根据 Box-Muller 方法使用查找表法将产生的均匀随机数转换为高斯分布随机数, 最后使用自动搜索逼近算法实现对目标信号不同信噪比噪声的添加。仿真和实测结果表明, 该装置可用于对无线通信信号进行高斯白噪声的添加。

关键词: 信号处理; FPGA; 信号源检验; 高斯白噪声; 矩阵变换

中图分类号: TN927 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)05-0068-04

A Zero-IF White Gaussian Noise Adding Device Based on FPGA

LU Lian-wei, SONG Jie, LUO Chang-qing
(Guangzhou HAIGE Communications Group Incorporated Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: This paper presents an FPGA based implementation for adding White Gaussian Noise (WGN). By using matrix transformation and XOR operation, uniformly distributed random numbers (UDRN) could be easily generated. Then we used look-up table to convert the UDRN into Gaussian Random Number (GRN) based on Box-Muller method. After GRN was generated, an automatic searching and approaching method was used to add certain White Gaussian Noise on a zero-IF signal to match a SNR demand. Results of simulations and experiments show that the device can be used to add White Gaussian Noise on signals of wireless communication systems.

Key words: signal processing; FPGA; signal source inspection; white Gaussian noise; matrix transformation

0 引言

在通信和信号处理系统中, 高斯白噪声是很常见的噪声信号, 因此, 需要利用高斯白噪声信号源检验和测试通信系统的误码率性能。目前, 在无线通信系统中大多采用商品化的信号源, 如 SMU200A 产生信噪比可配置测试信号来测试系统的误码率性能, 但是该设备体积比较大且价格昂贵, 不利于在批量测试中使用。因此, 设计实现一个结构简单、信噪比可调的高斯白噪声添加装置有非常必要的市场意义。

本文设计了一种用于零中频高斯白噪声添加的 FPGA 实现装置, 该装置主要包括高斯白噪声产生模块和

信噪比增益配置模块。其中: 高斯白噪声产生模块利用便于硬件实现的矩阵转换、异或运算以及查找表, 大大减小了硬件资源的消耗; 信噪比增益配置模块采用自动搜索算法实现加噪信号的高效输出和信噪比可调。

1 原理介绍

本文所述的高斯白噪声添加装置主要包括高斯白噪声产生模块和信噪比配置模块。下面分别介绍这两部分的原理方法。

1.1 高斯随机数产生方法

数字高斯白噪声发生器实际上产生的是伪随机数, 具有一定的周期性, 但是只要周期足够长, 就能满足实际工程的需要^[1]。适合 FPGA 实现的算法有线性反馈寄存器算法 (LFSR) 及 Tausworthe 算法等^[2]。LFSR 算法使用移位寄存器实现, 这种方法的周期为 $2^m - 1$, 其中, m 为移位寄存器的位数, 每个时钟输出 1 bit。假设要求

输出 n bit,则需要 $n \times m$ 个触发器实现,对硬件资源消耗比较大。Tausworthe 算法是对 LFSR 算法的改进,在 FPGA 中只用异或运算就可以得到,硬件实现简单,占用资源少,且前面的序列不会对随机数的质量产生制约性影响。因此,本文使用 2 个 Tausworthe 均匀分布随机数序列产生周期扩展的 Combined Tausworthe^[3],得到均匀分布随机数。

由于 Combined Tausworthe 随机数要产生一个 L 位的随机数需要 s 个时钟才能完成,在工程实现时产生高斯随机数的效率比较低。针对以上问题,文献[4]对算法进行了改进,使用矩阵变换可以在一个时钟内得到 s 位有效数据信息。根据矩阵变换得到均匀分布随机数表达式为

$$T_{n+1} = T_n \times A^s \quad (1)$$

式中: T_{n+1}, T_n 为随机数序列; $A = \begin{bmatrix} C_{k \times 1} & I_{(L-1) \times (L-1)} \\ \mathbf{0}_{(L-k) \times (L-1)} & \mathbf{0}_{1 \times 1} \end{bmatrix}$,为传递矩阵; $C_{k \times 1} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_k]$,为特征多项式 $P(z) = z^k - a_1 z^{k-1} - \dots - a_k$ 的系数向量; $\mathbf{0}_{(L-k) \times (L-1)}$, $\mathbf{0}_{1 \times 1}$,为零矩阵; $I_{(L-1) \times (L-1)}$ 为单位矩阵。

如图 1 所示,在得到两路均匀分布随机数后,Box-Muller^[5]方法将式(1)产生的均匀随机数 $t_{n,1}$ 和 $t_{n,2}$ 分别计算得到 f, g_1 和 g_2 ,最后根据式(2)、式(3)得到高斯分布随机数 α 和 β 。其中

$$\alpha = \sqrt{-2 \times \ln(t_{n,1})} \sin(2\pi t_{n,2}) \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt{-2 \times \ln(t_{n,1})} \cos(2\pi t_{n,2}) \quad (3)$$

$$f = \sqrt{-2 \times \ln(t_{n,1})} \quad (4)$$

$$g_1 = \sin(2\pi t_{n,2}) \quad (5)$$

$$g_2 = \cos(2\pi t_{n,2}) \quad (6)$$

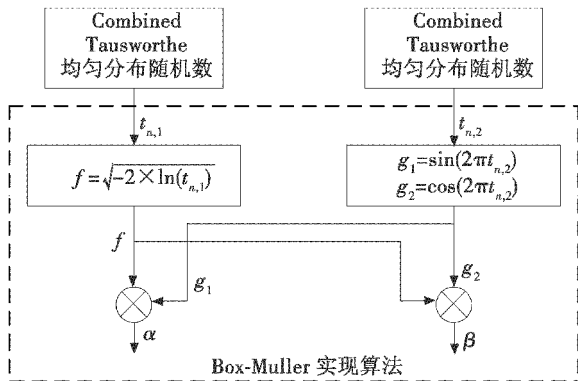


图 1 高斯随机数产生原理框图
Fig. 1 The block diagram of Gaussian random number generator

1.2 信噪比控制方法

在对零中频信号按照信噪比添加噪声时,需要计算信号与噪声的能量比。考虑到 FPGA 中乘法器资源有限,本文设计了一种搜索逼近算法来实现特定信噪

比的设置。

高斯白噪声发生模块产生单位能量的加性高斯白噪声 α 和 β ,进而得到能量为 2 的复噪声 $\alpha + j\beta$ 。因此,信噪比可表示为

$$R_{s,N} = \frac{a}{b} \times \frac{\bar{p}}{2} \quad (7)$$

式中: \bar{p} 为单位能量的平均值; $b = (2^{cnt_shift})^2$,为噪声能量; cnt_shift 为噪声信号 $\alpha + j\beta$ 向左移动的比特数,则噪声的幅度可表示为 $n = 2^{cnt_shift}$; $a = s^2 > 1$,为信号能量; s 为信号幅度。通过搜索逼近算法得到信号幅度和噪声幅度进而得到特定信噪比的信号。

具体的搜索流程如图 2 所示。

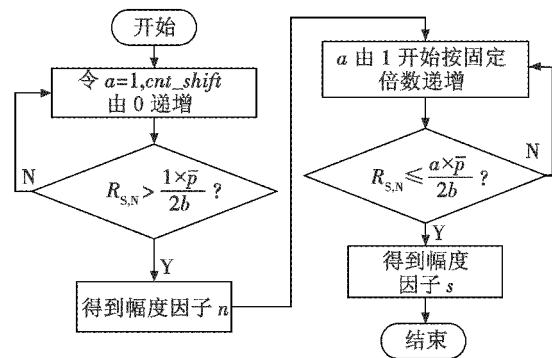


图 2 信噪比配置流程图

Fig. 2 Flow chart of SNR configuration

首先,令信号幅度 $s = 1$,则信号能量 $a = s^2 = 1$;然后, cnt_shift 由 0 递增,直到满足 $R_{s,N} > (1 \times \bar{p}) / 2b$ 为止,得到 cnt_shift 和噪声幅度 $n = 2^{cnt_shift}$;最后,使 a 由 1 开始按固定倍数 x^2 递增的方式搜索 a ,直到满足 $R_{s,N} \leq (a \times \bar{p}) / 2b$,完成搜索得到信号幅度 $s = \sqrt{a}$ 。

通过搜索逼近算法,把设定信噪比的乘法和除法转换成了加法和移位,减少了逻辑资源的消耗。

2 高斯白噪声添加装置的工程实现

基于 FPGA 的零中频高斯白噪声添加装置的实现结构如图 3 所示。

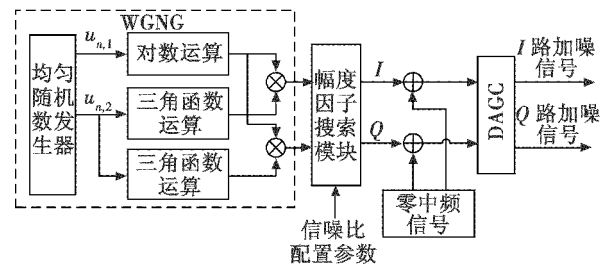


图 3 零中频高斯白噪声添加装置实现框图

Fig. 3 Block diagram of zero-IF white Gaussian noise adding device

系统主要由高斯白噪声产生模块 (WGNG)、幅度因子搜索模块和数字自动增益模块 (Digital Automatic

Gain Control, DAGC)组成。接口主要有信噪比控制口(用于输入信噪比的配置参数),零中频信号输入口以及零中频加噪信号输出口等。

2.1 高斯白噪声产生模块

WGNG 模块采用改进的 Combined Tausworthe 算法,在 FPGA 中使用异或运算产生均匀分布随机数,如图 4 所示。

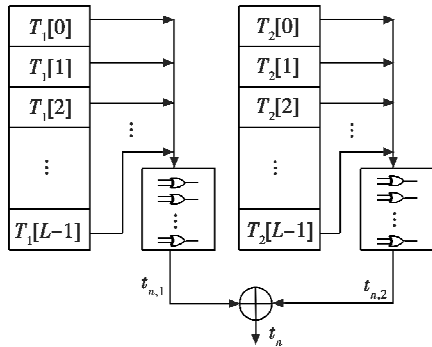


图4 均匀分布随机数发生装置结构图

Fig.4 Structure of uniformly distributed random number generator

随机序列产生装置主要由一个长度为 L 的寄存器和传递矩阵 A 构成。二进制随机初始序列 T_n 从寄存器输出,按照式(1)与传递矩阵 A 进行异或运算输出长度为 L 的 Tausworthe 随机序列。两路 Tausworthe 随机序列再经过异或运算最终得到随机数 t_n 。

根据式(2)和式(3)得到两路随机数 $t_{n,1}, t_{n,2}$ 就可以计算得到高斯白噪声序列。在 FPGA 中对数运算和三角函数运算对资源开销都比较大,一般采用查找表的方法实现这两种运算,通过查找表和一次乘法运算即可得到高斯随机数 t_n 。

2.2 幅度因子搜索模块

1.2 节中介绍的自动搜索逼近算法在 FPGA 实现中使用加法和移位运算实现信噪比的设定,极大地节省了硬件资源的消耗,具体实现流程如图 5 所示。

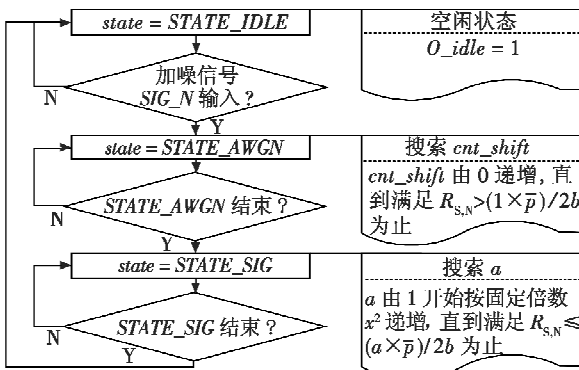


图5 搜索逼近算法流程

Fig.5 The processor of search approximation algorithm

搜索模块首先通过对 cnt_shift 由 0 递增得到噪声

幅度因子 $n = 2^{cnt_shift}$, 然后,再使 a 由 1 开始按固定倍数 x^2 递增的方式搜索 a 得到信号幅度因子 $s = \sqrt{a}$, 最后,根据信号幅度和噪声幅度输出 I, Q 两路正交信号。通过计算和实际测试使用该算法实现能量递增误差在 0.004 dB 内。

2.3 数字自动增益模块

如图 6 所示, DAGC 模块根据给定的门限 R 对得到的加噪信号进行自动调节。步骤如下:1) 使用 FPGA 自带的 IP 核乘法器进行信号的能量计算得到 $E_r(n)$, 并通过查找表的方式将能量值转化为对数形式 $E_{y1}(n)$; 2) 通过 $E_{y1}(n)$ 与门限值 R 的比较, 并进行对数的减法运算得到 $\varepsilon(n)$; 3) 使用反对数查找表得到幅度增益调节值 G ; 4) 得到增益调节值 G 之后把当前时刻的增益调节值与上一时刻的幅度增益 G_{n-1} 一起送入乘法器得到当前时刻的增益 G_n ; 5) 使用积分器的平均作用削减噪声对增益的干扰。

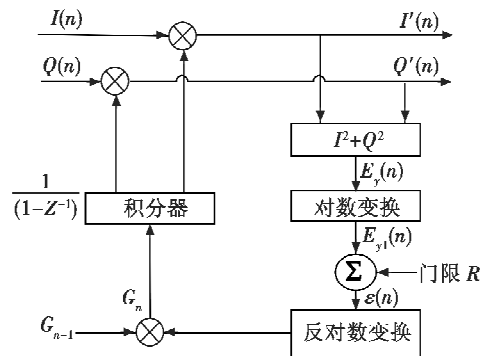


图6 数字自动增益模块

Fig.6 The module of digital automatic gain control

3 测试分析

本文设计的零中频高斯白噪声添加装置选用 Altera 公司的 Cyclone EP3C120F780I7 作为目标器件^[6], 产生含有 3 个位宽 $L = 32$ 的 Tausworthe 序列的均匀分布随机数, 消耗 FPGA 资源如表 1 所示。

表1 FPGA 资源消耗表

Table 1 Resource consumption of FPGA

消耗资源	数量及使用比例
逻辑单元	3937/119088 (3%)
管脚	183/532 (34%)
存储资源	145408/3981312 (4%)
乘法器	32/576 (6%)

通过 Matlab 对产生的高斯白噪声进行分析, 得到两路噪声序列的直方图统计如图 7 所示。这两个序列均值 $mean$ 和方差 std 分别为 0.0065, 0.9965 以及 0.0046, 0.9957, 可见, 本系统产生的高斯白噪声随机数与理论值非常接近。

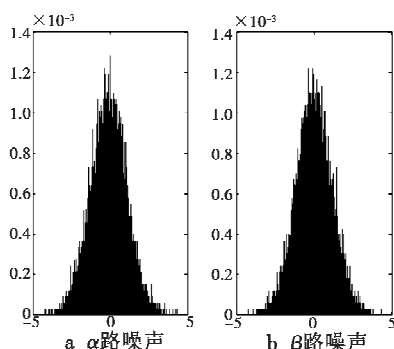


图7 高斯白噪声序列

Fig.7 The sequence of white Gaussian noise

使用本文设计的高斯白噪声添加装置对测试信号进行加噪,并对采集到的测试信号和加噪信号进行频谱分析。图8、图9分别为测试信号和添加噪声后的信号频谱图。图中:测试信号的带宽为2 MHz;成形滤波器的滚降因子为0.35;符号速率为1.48 Mb/s。噪声添加装置对测试信号采用4倍符号速率的采样时钟进行加噪得到带宽为5.92 MHz的信号。通过对比两图可以看出,该噪声添加装置的加噪效果很明显。

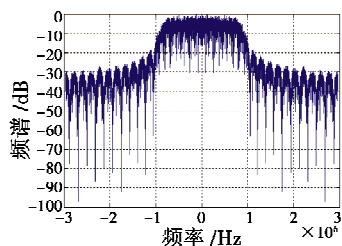


图8 未加噪信号频谱图

Fig.8 The spectrum of signal without adding noise

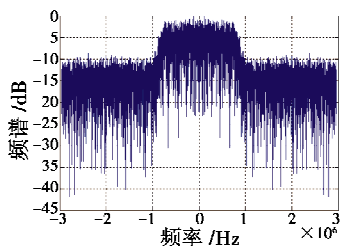


图9 加噪后的信号频谱图

Fig.9 The spectrum of signal with added noise

4 结束语

本文提出的零中频高斯白噪声添加装置首先使用矩阵变换和异或运算得到均匀分布随机数,然后根据Box-Muller方法使用查找表法将产生的均匀随机数转换为高斯分布随机数,最后采用搜索逼近算法来实现不同信噪比高斯白噪声信号的添加。系统使用硬件描述语言(Verilog HDL)实现,可作为一个独立的模块嵌入其他的应用系统中。目前,包含该噪声添加装置的功能模块已经用于某卫星通信系统基带系统的误码率性能测试。

参考文献

- [1] PROAKIS J G, SALEHI M. Digital communications [M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2001.
- [2] 杨自强,魏公毅. 综述:产生伪随机数的若干新方法[J]. 数值运算与计算机应用, 2001(3): 201-216. (YANG Z Q, WEI G Y. A review on some new methods to generate random numbers[J]. Journal of Numerical Methods and Computer Applications, 2001(3): 201-216.)
- [3] L'ECUYER P. Maximally equidistributed combined Tausworthe[J]. Mathematics of Computation, 1996, 65(213): 203-213.
- [4] 谷晓忱,张民选. 一种基于FPGA的高斯随机数生成器的设计与实现[J]. 计算机学报, 2011, 34(1): 165-173. (GU X C, ZHANG M X. Design and implementation of a FPGA based Gaussian random number generator[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(1): 165-173.)
- [5] LEE D U, VILLASENOR J D, LUK W. A hardware Gaussian noise generator using the Box-Muller method and its error analysis [J]. IEEE Transactions on Computers, 2006, 55(6): 659-671.
- [6] Altera Corp. Cyclone III device handbook [M]. California: Altera Corporation, 2009.

下期要目

碰撞角约束最优导引律关键问题的研究
天波雷达抗欺骗干扰能力定量评估模型
机载光电告警系统技术发展分析
基于集成小波神经网络的卫星电源系统故障识别
天空背景下红外目标的检测
自适应遗传算法在ADS-B优化布站中的应用

基于反射镜拼接的动态目标成像系统
基于双重域的图像去雾新算法
基于观测器的不确定混沌系统同步
无人软管式加油近红外信标检测与匹配方法
激光束海面散射回波建模与仿真
基于多小波包的红外/被动毫米波图像融合