

文章编号: 2096-1618(2025)01-0029-07

# 基于 FPGA 的雷达噪声信号设计与实现

赵将冬<sup>1</sup>, 张福贵<sup>1,2</sup>, 汪 治<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225)

**摘要:**针对一些典型分布的噪声信号在雷达标定和信号处理中的实际需求,基于元胞自动机和 Box-Muller 算法提出一种在现场可编程门阵列上能够实时产生多种概率分布特性的噪声信号生成方法。首先将对数和三角函数序列存入只读存储器;然后使用两个 32 阶的元胞自动机,产生两路服从均匀分布的随机序列,作为地址读取存储器的数据进行相应乘法运算,实现 Box-Muller 算法的快速运算,生成两路正交的高斯随机序列;最后利用高斯随机序列进行相应数学运算得到其他概率分布特性的随机序列。实验使用 Modelsim 进行了仿真,并结合 MATLAB 做了验证,仿真结果表明,随机序列统计直方图与标准分布曲线高度吻合,误差小于 0.1% 且正交性良好。基于 Xilinx 的 XC7Z100FFG900 现场可编程门阵列和 ADI 的数模转换器 AD9779 进行实现,得到的实验结果与仿真一致,且可以通过上位机对生成信号速率和类型进行切换,速度最高可达 4 Gb/s,满足实际需求。

**关键词:**Box-Muller 算法;瑞利分布;元胞自动机;现场可编程门阵列;高斯白噪声

**中图分类号:**TN955

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2025.01.005

## 0 引言

在模拟雷达回波对雷达进行定标时,除了需要模拟出雷达所探测到的真实目标的回波以外,各种复杂分布的干扰、噪声信号,以及杂波信号也是雷达回波的重要组成部分<sup>[1-5]</sup>。一些噪声雷达,使用噪声波形作为雷达的探测信号,其波形合成自由度大、隐蔽性好,具有很强的抗干扰和低截获性能<sup>[6-7]</sup>。钱程<sup>[1]</sup>认为在相干雷达接收机中,系统前端存在的噪声会使正交解调后的 I、Q 通道包含功率相等且服从零均值的高斯随机噪声。胡艳辉<sup>[2]</sup>使用无记忆非线性变换法和球不变随机过程法来产生具有一定概率分布的随机序列,并应用于雷达的噪声和杂波模拟中。张长隆<sup>[4]</sup>详细介绍了用软件和硬件实现雷达杂波和噪声信号的方法,上位机以 Montecarlo 方法产生满足特定幅度和谱分布的随机序列,通过数据传输到 DSP 中完成数据实时再处理。

张大伟等<sup>[8]</sup>针对物理方法产生随机数具有无法重现、费用较高等缺点,提出并详细介绍了线性同余算法,该算法具有产生速度快,输出序列周期长等特点。黄本雄等<sup>[9]</sup>提出基于 FPGA 的 Wallace 算法,利用正态分布的可加性直接产生高斯白噪声变量。冯建群

等<sup>[10]</sup>提出一种基于 Box-Muller 算法级联中心极限定理实现高精度高斯白噪声发生器的方法,并用 FPGA 实现。吴国望等<sup>[11]</sup>根据直接频率合成理论,对均匀分布的随机数进行白化处理,提出基于 FPGA 的高斯白噪声发生器实现方法,该方法实现简单快速,可移植性强。徐新才<sup>[12]</sup>对 Ziggurat 高斯随机数发生器和定点乘法器进行改进,减少硬件资源,提高了工作频率。郝黎宏<sup>[13]</sup>提出一种基于 Box-Muller 算法的高效高斯白噪声的 FPGA 实现方法,分别设计了线性移位寄存器(LFSR)以及基于查找表的对数运算和开方运算模块,并采用拉格朗日差值算法有效地节约了 FPGA 中资源的消耗。蔡俊晖等<sup>[14]</sup>基于 FPGA 运用 Box-Muller 算法提出一种能够实时产生多种分布特性噪声的信号生成方法。Mcfarland<sup>[15]</sup>提出一种改进 Ziggurat 算法,将金字塔层完全位于概率密度函数之下,从而消除在金字塔层内进行任何拒绝测试的需要,指数变量和正态变量的新算法的中位运行时间分别减少到 58% 和 53%。Yildirim A 等<sup>[6]</sup>详细介绍了一种简化现代噪声雷达数字信号生成的方法并基于 IFFT 实时生成,可以产生更快、更高质量的带宽限制噪声。Ispir M 等<sup>[7]</sup>提出一种实时中频噪声雷达信号发生器,该信号发生器可提供具有均匀、正态、指数和瑞利概率分布的伪随机信号,还可以生成具有任意带宽的均匀功率谱分布的正态分布序列。

双偏振天气雷达进行接收机双通道一致性的标定时,常用的方法是将频综输出的连续波测试信号通过功分器一分为二,分别注入水平和垂直接收通道。理论情况下信号处理器输出的差分反射率应该为零,但是实际由于水平和垂直接收通道接收机的增益并非完全相同,输出不会为零,而这个输出就是双通道的差异<sup>[16]</sup>。Zrnice 等<sup>[17]</sup>认为频综输出的连续波测试信号是窄带信号,而实际大气回波是宽带信号,如果用噪声源代替连续波信号对两个通道的接收机进行标定,更能反映两路接收机对实际大气回波的增益差别。

所以考虑到噪声信号在雷达信号处理和标定方面的实际需求,能够快速实时生成具有一定概率分布的高精度噪声信号具有重要意义。由于现场可编程技术的发展,基于硬件的噪声信号生成方法,因比软件生成方法具有巨大优势而受到广泛关注。实际工程中,如果要生成真实的随机信号,十分耗费时间和硬件资源。本文基于元胞自动机和 Box-Muller 算法提出一种在现场可编程门阵列上能够实时产生多种随机分布特性的噪声信号生成方法,虽然通过特定算法生成的序列仍然具有一定的周期性,但当重复周期非常大时,可以认为这种伪随机序列是随机的、不具备周期性。

## 1 复正交高斯序列的产生原理

对于产生高斯白噪声,简单的方法是采用在 MATLAB 中用 wgn 函数产生服从一定均值和方差的高斯白噪声序列,然后将数据序列存放在 FPGA 中的 ROM 进行回放。虽然使用这种方法简单且不占用逻辑资源,但是会占用大量的存储资源。回放时,仅仅只能保证回放的那一小段信号之间是不相关的,一旦数据回放完毕后进行重复回放,这时的数据和前面的数据就不满足不相关特性了。为了使整个过程中的噪声都满足不相关特性,可以先通过元胞自动机,得到均匀分布的伪随机信号,然后通过 Box-Muller 算法将均匀随机数转换为高斯随机数。

### 1.1 元胞自动机

均匀随机序列的生成主要有线性同余法<sup>[5]</sup>,梅森旋转法<sup>[18]</sup>,线性反馈移位寄存器<sup>[13]</sup>,元胞自动机法<sup>[19]</sup>。本文主要基于元胞自动机来进行设计。

元胞自动机的思想首先由 Stanislaw Ulam 提出,是一种特殊的有限状态机,具有时间、空间和状态离散的特性。简单来说,元胞自动机就像是围棋一样,当你在

一个网格中放入棋子时,必定会对其周围的网格产生影响。而元胞自动机就是一个这样类似的思路,改变某些网格中的状态从而影响周围的网格,如图 1 所示。

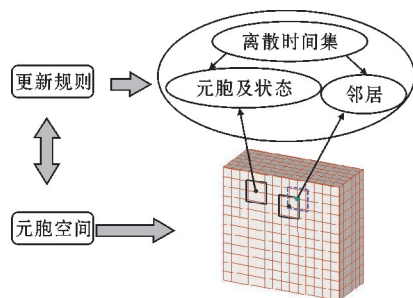


图1 元胞自动机示意图

在  $D$  维空间中,存在一组元胞单元组成的阵列,可用四元组表示一个元胞自动机:

$$CA = (A_D, Z_q, f_i(o, r), B)$$

式中,  $D$  维元胞单元构成的空间结构用  $A_D$  表示,元胞单元  $i$  的状态取值范围用状态空间  $Z_q$  表示;元胞自动机的邻域半径  $r$  确定的第  $i$  个元胞单元的  $o$  阶邻域状态配置与其转移状态之间的映射用  $f_i$  表示,称为邻域函数规则;某个元胞单元邻域半径之内的邻域单元在超出元胞自动机空间结构时的处理方法由边界条件  $B$  规定。

考虑到实际需求,令  $D=1, o=1, q=2$ ,按照邻域函数规则与邻域元胞单元的关系可以确定下一个状态,并且每一个元胞单元都可以看作是一个小的状态机。每一个元胞单元的现态和与该元胞相邻的那些元胞单元的现态的组合逻辑决定了该元胞的次态,结构如图 2 所示。每一时刻每一个元胞都更新一个新的状态,表示为

$$s_i^{t+1} = f_i(s_{i-1}^t, s_i^t, s_{i+1}^t)$$

式中,  $s_i^{t+1}$  表示  $t+1$  时刻第  $i$  个元胞的状态,  $f_i$  是含有 3 个变量的领域规则。

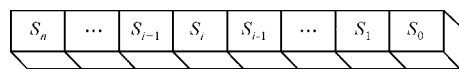


图2 一维元胞自动机邻居状态结构

结合文献[11,14,20]的方法,编程时通过两个 32 阶元胞自动机的均匀随机数发生器来产生均匀随机数,通过给出 32 位元胞的初始值和规则号,将单个元胞例化 32 次,就可以得到 32 位的元胞自动机。图 3 是  $n$  阶可编程元胞自动机的硬件结构图,其中规则地选取和控制使用 90 规则和 150 规则, self 表示中间元胞, left 表示自己左边的元胞, right 表示自己右边的元胞, ctrl 表示规则号控制。

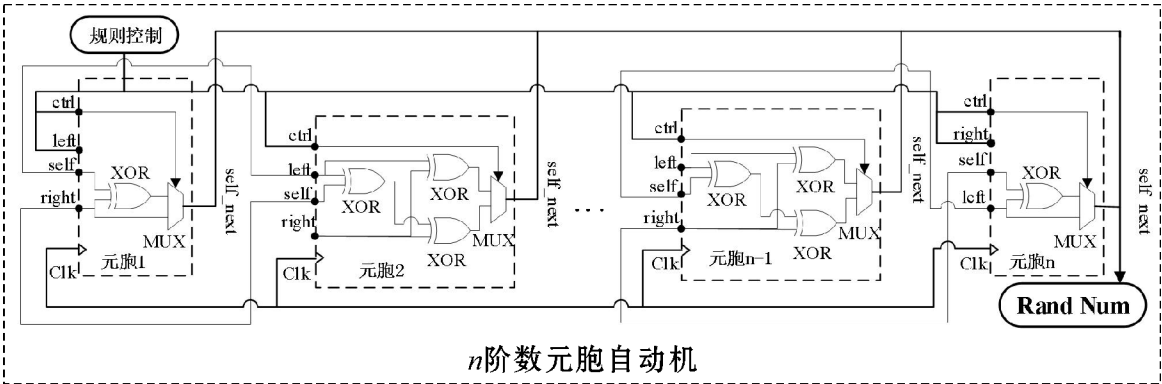


图 3 n 阶可编程元胞自动机的硬件结构

表 1 规则 90 邻域状态

$s_{i-1}^t$	$s_i^t$	$s_{i+1}^t$	$s_i^{t+1}$
1	1	1	0
1	1	0	1
1	0	1	0
1	0	0	1
0	1	1	1
0	1	0	0
0	0	1	1
0	0	0	0

表 2 规则 150 邻域状态

$s_{i-1}^t$	$s_i^t$	$s_{i+1}^t$	$s_i^{t+1}$
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

观察表 1 和表 2 可以很容易地发现一个规律,中间元胞 $s_i^t$ 的下一个状态 $s_i^{t+1}$ 由左邻居 $s_{i-1}^t$ 和右邻居 $s_{i+1}^t$ 异或而成。表 1 中间元胞的下一个状态为:01011010,转换为十进制即为 90,所以将其命名为规则 90。同样的,表 2 为规则 150。知道了下一状态产生的规则后,便可以通过图 2 编程实现。

该自动机有  $2^{232} \approx 1.85 \times 10^{19}$  种状态,如果 FPGA 时钟采用 100 MHz,其重复周期为  $1.85 \times 10^{11}$  s,约为 5850 年。由于周期很大,可以近似认为其是“真随机的”。图 4 为 FPGA 通过元胞自动机生成的均匀随机数。

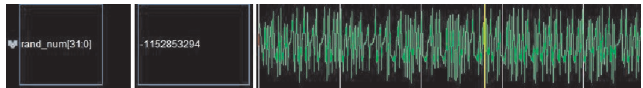


图 4 均匀随机数仿真波形

存储 20 万个数据样本,用 MATLAB 画出统计直方图如图 5 所示,可以看出是满足均匀分布的。

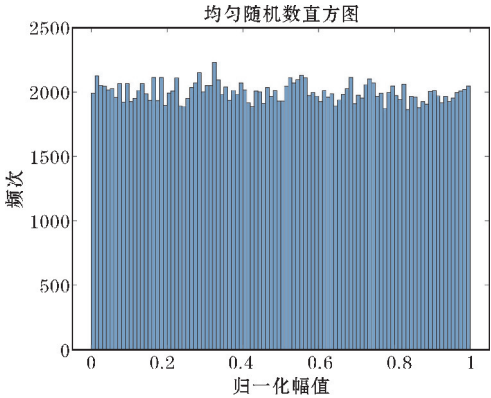


图 5 均匀随机数统计直方图

1.2 Box-Muller 算法

高斯随机序列的生成方法主要有 Ziggurat 算法<sup>[15]</sup>、Wallace 算法<sup>[9]</sup>、Box-Muller 算法<sup>[10]</sup>。Ziggurat 算法的基本思想是利用拒绝采样,效率高,但是输出不连续,不利于硬件实时生成设计<sup>[20]</sup>;Wallace 算法由于其结构存在反馈支路,会使部分数据之间具有相关性;Box-Muller 算法会使用到对数函数和三角函数,但通过查表可以避免做对数和三角函数运算,以消耗一定的存储资源为代价来提升效率。下面重点介绍 Box-Muller 算法。

通过 Box-Muller 变换可以由服从均匀分布的随机变量,得到服从高斯分布的随机变量。两个随机变量  $U_1$ 、 $U_2$  服从  $[0,1]$  上的均匀分布,且  $X$ 、 $Y$  满足:

$$X = \cos(2\pi U_1) \sqrt{-2\ln U_2}$$
$$Y = \sin(2\pi U_1) \sqrt{-2\ln U_2}$$

则  $X$  与  $Y$  服从标准的高斯分布,均值为 0,方差为 1。

2 基于高斯分布推导其他复杂分布

2.1 高斯噪声的强度、方差和均值

高斯噪声指的是幅度在概率上服从正态分布的噪声。高斯分布记为  $N(\mu, \sigma^2)$ ,其中均值(数学期望)

用  $\mu$  表示,方差用  $\sigma^2$  表示,当  $\mu=0, \sigma^2=1$  时,该分布称为标准正态分布。高斯分布的一维概率密度可表示为

$$f(x) = \sqrt{2\pi\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, -\infty < x < +\infty$$

高斯噪声随着时间可以产生无限多的值,显然是一个功率信号,从数学统计的角度,  $\sigma^2$  是高斯随机变量的二阶中心距。令  $\mu=0$ , 那么其二阶中心距等于二阶原点矩。一个随机信号的功率恰好是它的二阶原点矩,所以当噪声的均值是零的时候,噪声的平均功率等于其方差。所以要得到不同强度的高斯噪声只需要改变其方差即可,从而可以改变模拟回波的信噪比,对信号处理器进行测试标校。假设  $X \sim N(0,1), Y \sim N(\mu, \sigma)$ , 那么  $X, Y$  之间存在关系:

$$X = \frac{Y-\mu}{\sigma} \sim N(0,1)$$

可以很容易地改变随机变量的方差和均值,以满足需要。

## 2.2 瑞利分布和莱斯分布

根据定义,有复信号

$$Z = X + iY$$

式中:  $X \sim N(\mu_X, \sigma_X), Y \sim N(\mu_Y, \sigma_Y)$ , 当  $X$  和  $Y$  相互独立且正交,  $\mu_X = \mu_Y = 0, \sigma_X = \sigma_Y$  时,其模值  $|Z| = \sqrt{X^2 + Y^2}$  服从瑞利分布,即正交复高斯分布的模是服从瑞利分布的,其概率密度函数:

$$f(|z|) = \frac{|z|}{\sigma^2} e^{-\frac{|z|^2}{2\sigma^2}}$$

雷达在信号处理时是同时处理两路正交的 I、Q 信号,所以把满足  $X, Y$  分布的信号序列分别添加到 I、Q 信号中就可以实现添加服从瑞利分布的回波。

当  $X$  和  $Y$  相互独立且正交,  $\mu_X \neq \mu_Y, \sigma_X = \sigma_Y$  时,其模值  $|Z| = \sqrt{X^2 + Y^2}$  服从莱斯分布,也称为广义瑞利分布。其概率密度函数:

$$f(|Z|) = \frac{|z|}{\sigma^2} e^{-\frac{|z|^2 + u^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{|z|u}{\sigma^2}\right)$$

式中:  $u = |\mu_X - \mu_Y|, I_0$  称为修正的 0 阶第一类贝塞尔函数。当  $u=0$  时,莱斯分布退化为瑞利分布。

## 2.3 指数分布

为得到指数分布,假设  $U$  是服从均匀分布的随机变量,若  $X = -\frac{1}{\lambda} \ln U$ ,  $X$  服从指数分布。其概率密度函数如下:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

式中  $\lambda$  为任意常数。

## 3 服从各种分布信号的 FPGA 实现

### 3.1 实现流程

根据前面所述的元胞自动机, Box-Muller 算法,以及各种复杂分布信号的定义和关系,可以总结出 FPGA 实现服从各种分布信号的流程。

步骤 1 用 MATLAB 生成关于  $y = \sqrt{-2\ln x}, y = \sin 2\pi x, y = \cos 2\pi x$  的序列,并保存为 coe 文件,导入 FPGA 的 ROM 中。

步骤 2 通过两个 32 位的元胞自动机生成均匀随机序列,作为 ROM 的查表地址。

步骤 3 根据 Box-Muller 算法,调用乘法器,运算后得到正交的两路高斯信号。

步骤 4 经过有限次数学运算,生成服从瑞利分布、莱斯分布、指数分布的信号。

步骤 5 将实际生成的信号数据存储下来,在 MATLAB 进行分析。

步骤 6 Modelsim 仿真结合 MATLAB 辅助验证成功后,用 DAC 进行输出。

为了能够任意切换输出某种概率分布的信号,还需要添加一个多路复用器,实现流程见图 6。

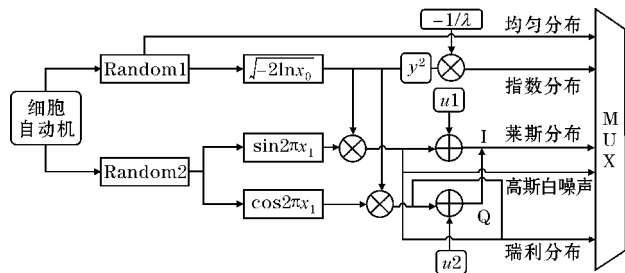


图 6 系统实现流程图

### 3.2 Modelsim 仿真

按照顺序地址读取 ROM,得到的三角函数和  $y = \sqrt{-2\ln x}$  的波形图,仿真结果如图 7 所示。

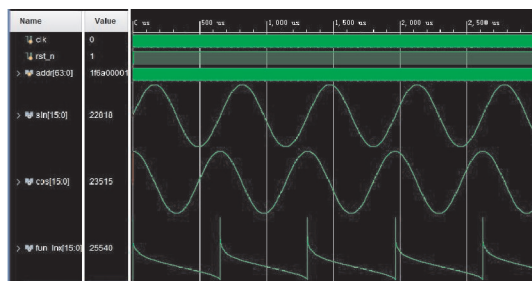


图 7 顺序地址读取 ROM 仿真波形

根据 Box-Muller 算法,将服从均匀分布随机序列作为查找表的地址,将从存储三角函数和  $y = \sqrt{-2\ln x}$  中读取出来的数据相乘,得到两路正交的高斯随机信号。将  $y = \sqrt{-2\ln x}$  与自己相乘得到服从指数分布的随

机信号,仿真结果如图 8 所示。

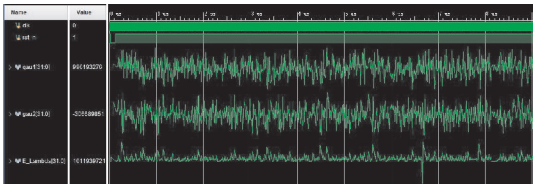


图 8 服从高斯和指数分布的信号仿真结果

3.3 MATLAB 辅助验证

为验证 FPGA 生成的信号是否满足特定的概率分布,随机存取 20 万个样本数据,用 MATLAB 进行分析,分别画出其统计直方图(图 9)。从直方图看出,用 FPGA 生成的信号的幅度分布基本和理想分布曲线吻合。

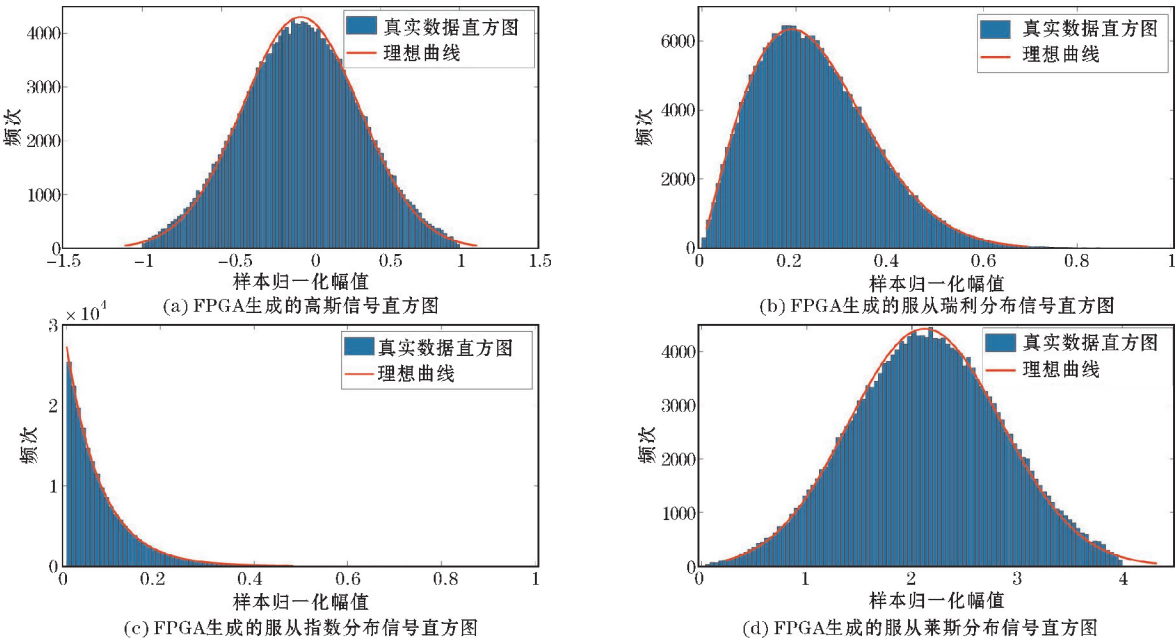


图 9 几种概率分布的统计直方图

为验证生成两路高斯信号正交性,画出其利萨如图形,如图 10 所示,图形是一个圆,表明正交性良好。

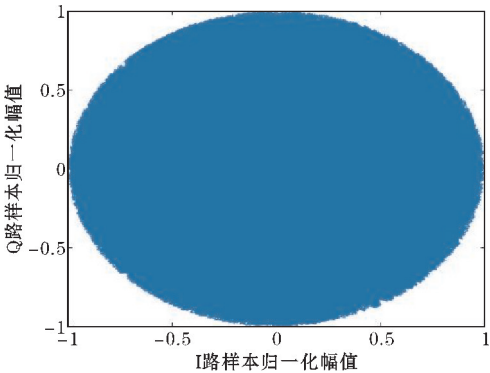


图 10 两路高斯信号利萨如图形

3.4 实验结果

实验使用 Xilinx 的 XC7Z100FFG900 以及 ADI 的数模转换器 AD9779 和低相噪锁相环 AD9516。AD9779A 是双通道、16 位高动态范围数模转换器 (DAC), 提供 1GSPS 采样速率, 可以产生最高达奈奎斯特频率的多载波, 且可以通过 SPI 协议对内部参数进行编程和回读, 来调节采样率和插值系数; AD9516 具有低抖动和相位噪声特性, 可最大限度地提高数据转换器性能, 且可以通过 SPI 协议对内部参数进行编程和回读, 来调节输出

时钟频率;XC7Z100FFG900 除了具有硬件逻辑单元, 还有针对双核 ARM<sup>®</sup> Cortex<sup>™</sup>-A9 的应用处理器单元, 可以很方便地使用网口与上位机连接通信, 以及通过 SPI 协议去编程和回读 AD9779 和 AD9516 的内部寄存器, 实时调节和监视 DAC 的工作状态。系统框图如图 11 所示, 实物硬件如图 12 所示。

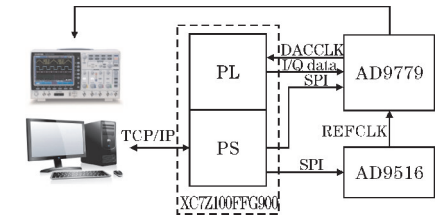


图 11 系统框图

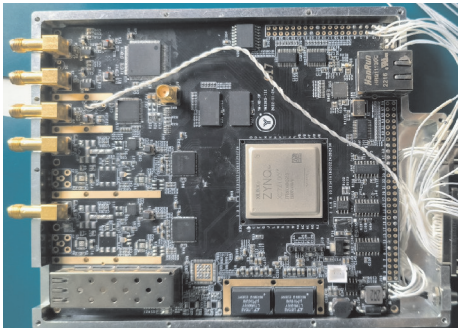


图 12 实物硬件图

将3.2节的程序继续进行综合和实现,配置AD9516输出频率720 MHz,AD9779采样率为180 MHz、4倍插值,下载到FPGA中,将DAC的输出接入到示波器,观察到两路正交的高斯信号如图13所示。

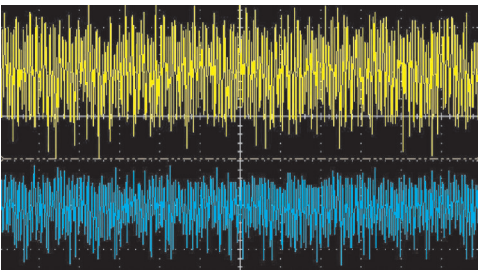


图13 示波器观察到的两路正交高斯信号

通过多路复用器进行切换,改变输入DAC的数据,即可输出3.2节所述的其他分布的噪声信号;通过SPI协议配置AD9516的输出频率和AD9779的采样率以及工作方式可以做到控制信号的输出速率,实验发现信号生成速率最高可达4 Gb/s。

3.5 信号质量与误差分析

由于在数字系统中,会对数值进行量化,这就带来了不可避免的误差。在3.3节中从图形上粗略的看出仿真和理想情况基本吻合。为进一步验证实际生成信号的精度,利用Xilinx的ILA通过JTAG读回数据,对

其均值和方差进行分析。对于高斯分布 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ,其理论均值和方差分别为 $\mu, \sigma^2$ 。指数分布 $X \sim E(\lambda)$ 其理论均值和方差分别为 $\frac{1}{\lambda}, \frac{1}{\lambda^2}$ 。对于瑞利分布 $X \sim \text{rayleigh}(\sigma^2)$ ,均值为

$$\begin{aligned} E(X) &= \int_0^{+\infty} x \frac{x}{\sigma^2} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} dx \\ &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x^2}{\sigma^2} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} dx \\ &= \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} dx \right] \\ &= \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \end{aligned}$$

方差为

$$\begin{aligned} D(X) &= E(X^2) - E^2(X) \\ &= \int_0^{+\infty} x^2 \frac{x}{\sigma^2} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} dx - E^2(X) \\ &= \frac{4-\pi}{2} \sigma^2 \end{aligned}$$

对于莱斯分布 $X \sim \text{rice}(v, \sigma)$ ,均值和方差没有确切的公式,这里通过MATLAB进行计算。实际数据和理论情况的各种分布的均值和方差见表3。可以看出实际数据的均值和方差和理论对比误差不超过0.1%,精度较高。

表3 误差对比分析

分布	实际		理论		误差/%	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差
$N(0,1)$	-0.00029	1.00088	0.00000	1.00000	0.00029/-	0.00088/0.088
$E(1)$	1.00051	0.99983	1.00000	1.00000	0.00051/0.051	0.00017/0.017
rayleigh(1)	1.25352	0.42965	1.25334	0.42926	0.00018/1.436	0.00039/0.091
rice(1,1)	1.54886	0.60385	1.54799	0.60221	0.00087/0.056	0.00164/0.003

4 结束语

基于元胞自动机和Box-Muller算法提出一种在现场可编程门阵列上能够实时产生多种概率分布特性的噪声信号生成方法,详细阐述了算法原理,特别是如何进行各种概率分布之间的转化,在实现环节给出了详细的步骤。实验结果表明,该方法生成的噪声信号精度很高,最大误差只有0.1%,可以通过上位机对生成信号速率和类型进行切换,且输出速率最高可达4Gb/s。为雷达系统回波模拟提供高精度的噪声,操作简单,可以用来对双偏振天气雷达接收机双通道一致性进行标定,具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 钱程. 雷达信号建模与仿真[D]. 南京:南京大学,2012.

[2] 胡艳辉. 雷达回波信号的建模与仿真研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2007.

[3] 陈斯敏. 雷达杂波的建模与仿真[D]. 成都:四川大学,2006.

[4] 张长隆. 杂波建模与仿真技术及其在雷达信号模拟器中的应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2004.

[5] 张宝宝. 雷达杂波的建模仿真技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2007.

- [6] Yıldırım A, İspir M, Özdil Ö. Method for generating noise radar signals[C]. International Conference on Radar Systems (Radar 2017). IET, 2017: 1–5.
- [7] İspir M, Yıldırım A. Real-time signal generator for noise radar[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2020, 35(9): 42–49.
- [8] 张大伟, 邵英海, 左垒. 基于线性同余法的伪随机数产生算法[J]. 辽东学院学报(自然科学版), 2018, 25(3): 201–206.
- [9] 黄本雄, 侯洁, 胡海. 高斯白噪声发生器在FPGA中的实现[J]. 微计算机信息, 2007(20): 165–167.
- [10] 冯建群, 文海明. 高斯白噪声发生器的FPGA实现[J]. 微型机与应用, 2012, 31(21): 73–75.
- [11] 吴国望, 屈晓旭, 徐丹. 基于FPGA的高斯白噪声信号源实现[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(6): 119–121.
- [12] 徐新才. 基于FPGA的高斯随机数发生器的设计与实现[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [13] 郝黎宏. 一种数字高斯白噪声装置的FPGA实现[J]. 电子技术, 2022, 51(7): 1–3.
- [14] 蔡俊晖, 潘明海. 实时高精度雷达噪声信号产生方法与FPGA实现[J]. 电讯技术, 2022, 62(12): 1846–1852.
- [15] McFarland C D. A modified ziggurat algorithm for generating exponentially and normally distributed pseudorandom numbers[J]. Journal of statistical computation and simulation, 2016, 86(7): 1281–1294.
- [16] 李喆, 王崇文, 李春化, 等. 双发双收双偏振天气雷达差分反射率工程标定方法[J]. 气象科技, 2014, 42(6): 6.
- [17] Zrnic D S, Melnikov V M, Carter J K. Calibrating differential reflectivity on the WSR-88D[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2006, 23(7): 944–951.
- [18] Harase S. On the F2-linear relations of Mersenne Twister pseudorandom number generators[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2014, 100: 103–113.
- [19] Levina A, Mukhamedjanov D, Bogaevskiy D, et al. High performance parallel pseudorandom number generator on cellular automata[J]. Symmetry, 2022, 14(9): 1869.
- [20] 钱柳羲. 高斯随机数发生器的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.

## Design and Implementation of Radar Noise Signal based on FPGA

ZHAO Jiangdong<sup>1</sup>, ZHANG Fugui<sup>1,2</sup>, WANG Zhi<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Key Laboratory of Atmospheric Exploration of China Meteorological Administration, Chengdu 610225 China)

**Abstract:** To solve the practical requirements of some typically distributed noise signals in radar calibration and signal processing, a noise signal generation method that can generate a variety of randomly distributed characteristics in real time on a Field Programmable Gate Array (FPGA) based on cellular automata and Box-Muller algorithm was proposed. First, logarithmic, and trigonometric sequences are stored in Read-Only Memory (ROM). Then, two 32nd-order cellular automata are used to generate two random sequences that obey uniform distribution, which are used as the data of the address reading memory for corresponding multiplication operations, to realize the fast operation of the Box-Muller algorithm and generate two orthogonal Gaussian random sequences. Finally, the Gaussian random sequence is used to perform the corresponding mathematical operation to obtain the random sequence with other probability distribution characteristics. The simulation results show that the statistical histogram of the random sequence is in good agreement with the standard distribution curve, the error is less than 0.1% and the orthogonality is good. The experimental results obtained by the XC7Z100FFG900 field programmable gate array based on Xilinx and AD9779 digital-to-analog converter based on ADI are consistent with the simulation, and the generated signal rate and type can be switched by the host computer, with the speed-up to 4Gb/s, to meet the actual demand.

**Keywords:** Box-Muller; Rayleigh; cellular automata; FPGA; Gaussian White Noise