

文章编号: 2096-1618(2021)01-0019-05

雷达自发产生模拟目标回波数据的方法研究

官 毓, 杜雨谔, 刘 艺, 叶盈群
(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:在整部雷达项目的研制和生产中,由于雷达外场调试难度大,若全部采用外场试飞,成本太高且外界影响因素太大反而在很多情况下不便于调试,因此雷达目标模拟技术开始盛行。在雷达目标回波模拟中,雷达回波模拟数据的产生有很多种方法,普遍是外接一个雷达目标模拟器产生波形。通过介绍 Cordic 算法原理,借用 Cordic 算法设计了一种更简单、便捷、易操作的雷达自发产生目标模拟数据的方法,在 FPGA 中通过相位变化叠加目标信息。此方法便于项目内部使用,不需借用其他硬件,即可在雷达内部 FPGA 模块自发产生模拟目标回波数据发送至信号处理板,达到快速验证数据通路、信号处理、数据处理的基本功能的目的,且通过仿真和上板验证了该方法有效,具有一定的实用性。

关 键 词:雷达回波;目标模拟;Cordic 算法;FPGA;自发产生

中图分类号:TN957.51

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2021.01.004

0 引言

雷达全英文为 Radar-Radio Detection and Ranging,意为无线电检测与测距^[1],在 20 世纪初作为军事急需设备登陆世界。二战的爆发,由于军事上的迫切需求,雷达登上了人类历史舞台并且获得了极大的应用与发展^[2],短时间内在世界各大战场中起到了关键作用。随着时间的推移和战事的减少,20 世纪末开始,雷达逐渐进入民用市场,包括汽车防撞雷达、气象雷达、无人机探测雷达等相继进入人们的视野,在日常生活中起到了不可或缺的作用。

然而雷达研制的过程极其耗费人力、财力,且周期偏长,尤其是在外场调试的时候,外场试飞成本太高,而且很容易受到不良外界因素的影响很难顺利开展,随着现代雷达系统的功能日益复杂和任务多样化,系统调试难度也不断增大^[3],雷达目标模拟器应运而生,在雷达调试中起到了不可磨灭的作用。目标模拟器在雷达的研制生产过程中具有重要的意义^[4]。在现代雷达调试和外场维护中,雷达性能指标的测试是一个重要环节,如果采用真实的目标进行外场试飞,不但耗费大量的人力、物力,而且试飞结果不准确,无法真实反映雷达的性能参数,所以采用目标模拟技术是一个理想的选择^[5]。

雷达发射的信号本身不包含任何信息,只有当发射信号遇到目标反射回波后才可包含目标的信息^[6],

体现在回波的时延、强度因素以及速度信息等^[7]。雷达目标模拟作为一种辅助雷达测试技术,是为雷达系统提供模拟真实环境下的回波信号,即先接收雷达的原始发射信号,然后对该信号加入目标特征的处理,产生雷达实时回波,达到检测目的^[8]。作为雷达模拟测试平台,目标模拟器可为雷达系统整架联调提供有效的调试平台^[9]。在工程应用中,做简单回环测试时有时并不需要外接雷达模拟器,在节约成本的基础上,提出一种雷达自发产生目标回波模拟数据的方法,主要任务是验证雷达接口、通路、信号处理、数据处理等功能和指标,主要功能是采用 MATLAB 软件产生线性调频信号,送入信号处理板通过 Cordic 算法和回波模拟模块进行调相和叠加多普勒信息,完成回波模拟。文中利用雷达自身基于 FPGA 的硬件平台,采用 ISE 软件编程实现目标模拟过程。

1 雷达回波信号

雷达回波信号包含了目标对于雷达的距离(时延)和速度(多普勒)信息^[10]。

点目标回波的数学模型,对于发射信号, f_0 为载波,有

$$s(t) = u(t) \cdot e^{j2\pi f_0 t} \quad (1)$$

对于回波信号, τ 为回波时间,有

$$s_r(t) = u(t - \tau) \cdot e^{j2\pi f_0(t - \tau)} \quad (2)$$

对于运动点目标, R_0 为初始距离; V 为速度; c 为光速; ϑ 为脉压的调制; f_d 为多普勒频率。有

$$s_r(t) = u[t - \tau(t)] \cdot e^{j2\pi f_0[t - \tau(t)]} \quad (3)$$

于是

$$R(t) = R_0 - VT, \tau = \frac{2R_0}{c}, \partial = 1 + \frac{2v}{c}$$

$$f_d = \frac{2v}{c}f_0 = \frac{2v}{\lambda}, \partial \approx 1, f_0 \gg f_d$$

$$\begin{cases} s_r(t) = u\left[t - \tau + \frac{2vt}{c}\right] \cdot e^{j2\pi f_0\left[t - \tau + \frac{2vt}{c}\right]} \\ s_r(t) = u[\partial t - \tau] \cdot e^{-j2\pi f_0\tau} \cdot e^{j2\pi(f_0 + f_d)t} \end{cases} \quad (4)$$

所以

$$s_r(t) = u[t - \tau] \cdot e^{j2\pi(f_0 + f_d)(t - \tau)} \quad (5)$$

即 $s_r(t)$ 为带有目标信息的雷达回波,由此可知,只需要在原发射信号上进行多普勒频率 f_d 调相,再考虑时间因素就可得出经过下变频去载波 f_0 之后的带有目标信息的 IQ 信号。

2 雷达目标模拟原理

2.1 雷达线性调频原理

为了提高雷达的分辨力和测距精度,要求信号具有大带宽;提高速度分辨力和测速精度;要求信号具有大时宽;除此之外,提高雷达作用距离又要求信号具有大的能量。在设备功率受限的情况下,大的信号能量只能靠加大信号的时宽限制,这都要求信号具有大的时宽、带宽乘积。由信号与系统理论得知,普通信号的时宽带宽乘积为一常量,所以信号同时具有大的时宽和带宽是不可能的。为了解决这一矛盾,研发出了脉冲压缩技术,有效地解决了雷达作用距离和距离分辨力的矛盾。线性调频信号便是脉冲压缩技术的一种,其产生和处理都比较容易,技术成熟。

线性调频的数学表达式:

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j\pi K t^2} \quad (6)$$

对时间取微分后的瞬时频率:

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\pi K t^2)}{dt} = Kt \quad (7)$$

信号的带宽是 chirp 信号的斜率和时间的乘积:

$Bw = |K|T$; 带宽决定了能达到的分辨率。

首先用 Matlab 产生一个采样率为 25 M, 带宽为 20 M, 时宽为 8 μs 的线性调频信号, 如式 (8)、图 1 所示。

$$S(t) = e^{jK\pi t^2} \quad (8)$$

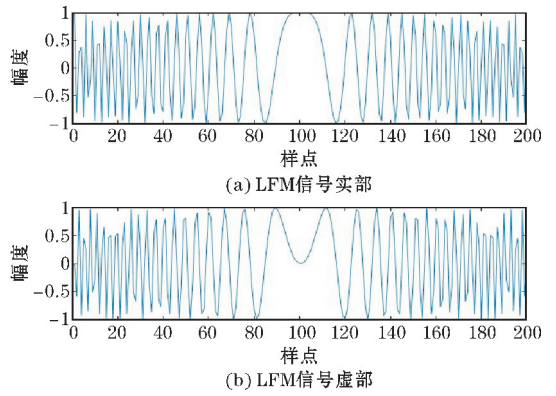


图1 线性调频信号

式(8)这个信号是不包含目标信息的,将其叠加模拟目标信息,由于是下变频之后的模拟数据,即去除载波后

$$S_r(t) = e^{jK\pi t^2 + j2\pi f_d t} \quad (9)$$

首先在 FPGA 里面接收一个 DSP 事先计算好的多普勒频率 freq_dopler 、目标速度 tar_velocity_x 、 tar_velocity_y 、 tar_velocity_z , DSP 强大的数学运算功能可以很简便地算出这些三维目标运动参数,不像 FPGA 进行计算会消耗大量资源:

$$\text{freq_dopler} = 4\pi \frac{v}{\lambda} \quad (10)$$

在 FPGA 里面将其与采样时间 times_cnt 相乘,便得到一个相位偏移量 phase_turn ,通过这个相位偏移量如何将它叠加到想要的波形上呢,于是引入 Cordic 算法,即一种坐标旋转数字计算方法。

2.2 Cordic 算法基本原理

Cordic 算法是一个将复杂运算简化的算法,有些运算太复杂在 FPGA 中很难实现,或者可以说是浪费资源,但将这些运算简化后,它仅仅需要移位(除 2)和加法的多次迭代就能完成,这在 FPGA 中就很好实现,只需一个最小的查找表(LUT),FPGA 就可以产生精确的正余弦波形。Cordic 算法的核心思想是将旋转角度 θ 拆分为多个步骤,依次迭代进行,迭代次数越高,得到的正余弦波形精度越高。

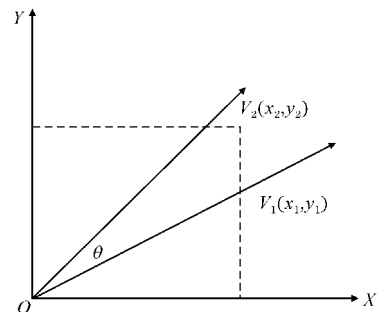


图2 Cordic 坐标旋转思想

图 2 为 Cordic 原理示意图,初始向量 $V1$ 经过旋转角度 θ 后得到向量 $V2$ 。有

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \cdot \cos\theta - y_1 \cdot \sin\theta \\ x_2 = (x_1 - y_1 \cdot \tan\theta) \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} y_2 = y_1 \cdot \cos\theta + x_1 \cdot \sin\theta \\ y_2 = (y_1 + x_1 \cdot \tan\theta) \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (12)$$

在硬件中为了方便 FPGA 的实现,让每一次旋转的角度 θ 为正切值 2 的倍数,即

$$\theta_i = \text{atan}(2^{-i}) \quad (13)$$

则

$$\cos\theta_i = \sqrt{\frac{1}{1+2^{-2i}}} \quad (14)$$

约定以 δ_i 代表向量的旋转方向,逆时针旋转表示为 +1,顺时针旋转用 -1 表示,再用 $\sqrt{\frac{1}{1+2^{-2i}}}$ 这个模校正因子对输入数据进行校正,所以第 i 步的旋转公式为

$$x_{i+1} = (x_i - \delta_i \cdot y_i \cdot 2^{-i}) \cdot \sqrt{\frac{1}{1+2^{-2i}}} \quad (15)$$

$$y_{i+1} = (y_i + \delta_i \cdot x_i \cdot 2^{-i}) \cdot \sqrt{\frac{1}{1+2^{-2i}}} \quad (16)$$

校正后得

$$x_{i+1} = (x_i - \delta_i \cdot y_i \cdot 2^{-i}) \quad (17)$$

$$y_{i+1} = (y_i + \delta_i \cdot x_i \cdot 2^{-i}) \quad (18)$$

校正后就只有加减法和移位了, N 次迭代可以得到如下结果:

$$x_n = x_0 \cdot \cos z_0 - y_0 \cdot \sin z_0 \quad (19)$$

$$y_n = y_0 \cdot \cos z_0 + x_0 \cdot \sin z_0 \quad (20)$$

将角度值(也就是要进行调相的相位)作为 z_0 输入,经过多次迭代后输出结果 x_n 和 y_n 就是所需要的三角函数值,也是需要进行 IQ 两路的调相的参数。所采用的迭代方程组为

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i - \delta_i \cdot y_i \cdot 2^{-i} \\ y_{i+1} = y_i + \delta_i \cdot x_i \cdot 2^{-i} \\ z_{i+1} = z_i - \delta_i \cdot \text{atan}(2^{-i}) \end{cases} \quad (21)$$

将相位偏移量 phase_turn 通过这个 Cordic 算法,得到用来给 IQ(虚部和实部)两路信号调相的余弦波和正弦波,将这两个函数波形与基础线性调频信号做复数相乘便得到含有目标信息的线性调频信号实部和虚部,也是需要送出目标模拟模块的下变频之后的 IQ 两路信号。

3 目标模拟方法实现

对信号进行调相的详细过程见图 3,首先接收来自 DSP 计算好的多普勒频率 freq_dopler 、目标速度 tar_velocity_x 、 tar_velocity_y 、 tar_velocity_z ,将它与采样时

间计数 times_cnt 相乘,便得到输入进 CORDIC 模块的相位变化,在 CORDIC 模块中对这个相位变化进行算法实现,输出用来调相的余弦波和正弦波,将其与从 ROM 中读取的来自 MATLAB 产生的线性调频基础信号实部和虚部进行复数相乘,得到模拟含有目标信息的下变频之后的 IQ 两路的数据。

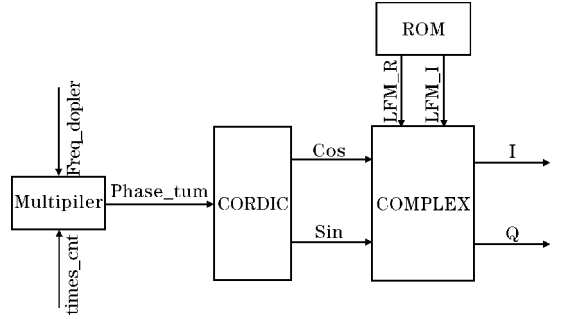


图 3 目标模拟模块的调相实现

4 整个模拟数据系统流程和仿真

整个目标模拟数据系统如图 4 所示,先接收雷达模拟目标参数、天线扫描参数、系统命令,命令控制接口完成这部分功能,由 SPI 接口接收这些参数组成的帧数据,对它进行解帧,得到起始方位角、起始俯仰角、目标速度、天线控制方位角、天线控制俯仰角,将起始方位角、起始俯仰角、目标速度送入目标模拟模块进行目标模拟,将天线控制方位角、天线控制俯仰角送入比较判断模块后续使用。

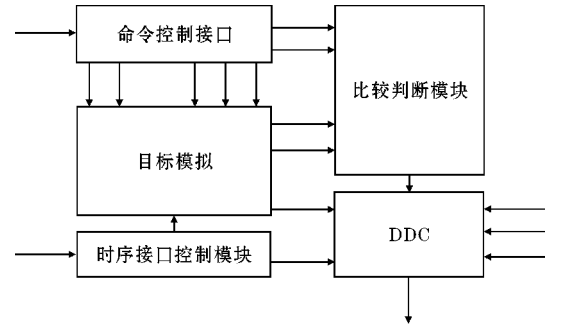


图 4 整个模拟数据系统的实现

整个系统时序由时序接口控制模块实现,帧脉冲来临时对其进行处理,分别送入相应时序给目标模拟模块和 DDC(数字下变频)模拟模块。目标模拟模块接收相应参数后进行计算,根据目标速度、起始方位角、起始俯仰角、起始波门等参数计算当前方位角、当前俯仰角送入比较判断模块,计算当前波门送入 DDC 模拟模块。比较判断模块接收来自命令控制接口的天线控制方位角、天线控制俯仰角和来自目标模拟模块的当前俯仰角、当前方位角进行判断。当雷达扫描波束恰好扫描到目标时,目标的方位角、俯仰角和天线的

方位角、俯仰角应相同,比较判断模块就执行此功能,对这 4 个数据进行两两对应比较,输出一个目标模拟使能,当它拉高时表示目标和天线的方位角、俯仰角匹配,否则一直拉低,将整个使能信号送入 DDC 模拟模块。DDC 模拟模块接收各模块的数据后,进行处理。

噪声也是由 MATLAB 产生一个高斯白噪声来进行模拟,当接收到的目标模拟使能信号拉高时,从 ROM 中读取线性调频基础信号,对其进行如图 3 所示的调相处理,通过 Cordic 算法和复数乘法模拟含有目标信息的雷达回波信号,拉低时读取噪声信号,这样就模拟了一个简单的真实环境因素,再组成和路和差路信号通过 SRIO 接口送出进行脉压等后续操作。

5 技术性能验证

Modelsim 部分仿真如图 5 所示。

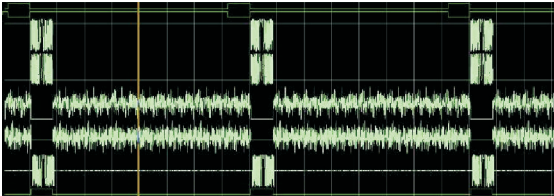


图 5 Modelsim 仿真

TR 脉冲(发送和接收脉冲)交替,在接收脉冲时,目标模拟使能在模拟方位俯仰对准的情况下拉高,拉高时输出经过 Cordic 等处理好的带有目标回波的波形,其余情况输出噪声。

将上述 Modelsim 部分仿真数据导入 Matlab 进行验证,产生的线性调频回波信号虚部如图 6 所示。

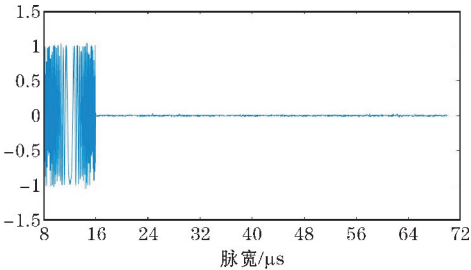


图 6 回波信号虚部

经匹配滤波脉压后得到图 7 的结果。

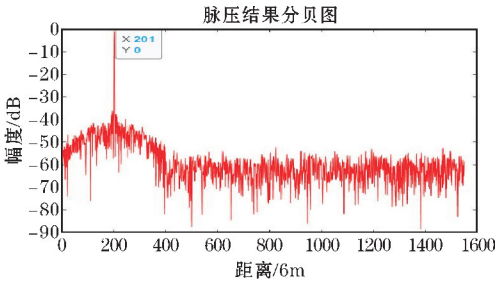


图 7 Matlab 脉压后结果

FPGA 脉压后结果如图 8 所示。

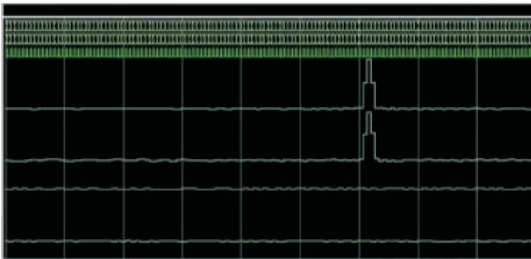


图 8 FPGA 脉压后结果

由图 8 所示的 FPGA 脉压后结果与图 7 的 Matlab 脉压结果比对,发现几乎重合,性能良好。

由图 6 可看出目标回波延迟时间是 8.04 μ s(线性调频信号脉宽为 8 μ s),计算的目标初始位置在离雷达 1206 m 处。

系统数据分析结果如表 1 所示,理论目标距离为 1200 m,计算目标距离为 1206 m,误差为 6 m(0.5%),在项目误差允许范围之内,满足设计要求,性能良好。

表 1 系统性能分析			
模拟目标 初始位置	目标回波 延迟时间	计算目标 初始位置	误差
1200 m	8.04 μ s	1206 m	6 m(0.5%)

整个系统开始模拟后模拟目标的航迹如图 9 所示。可以看出,显控终端清晰显示出了 1.2 km 处模拟目标的航迹,用此方法得出的模拟数据得以验证雷达的信号处理、数据处理等基本功能。

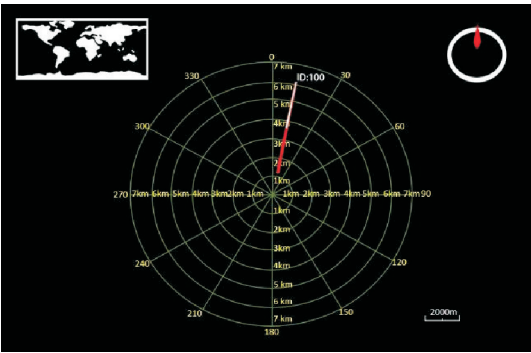


图 9 模拟目标航迹显示

6 结束语

论述了雷达目标模拟原理,提出一种较为方便的快捷验证雷达数据通路、接口、信号处理流程、数据处理流程基本功能的模拟数据方法。方法可以在原有雷达硬件上进行操作,不必外接雷达模拟器,且把复杂计算,比如目标坐标转换放入 DSP 里面运算,充分利用 DSP 在计算方面的优势,又能尽量节约 FPGA 上的资源。经 Matlab 结果与 FPGA 结果比对,此方法性能良

好,在项目需求中,进行简单雷达功能测试时使用此方法可以有效节约时间和成本,此设计方法经过仿真和上板验证查验,达到设计目标。

参考文献:

- [1] 王孝辉. 一种便携型雷达目标模拟器[J]. 现代商贸工业, 2018, 39(28): 190-191.
- [2] 何丙乾. 基于FPGA的雷达目标模拟器设计与实现[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [3] 庄雷, 张海龙, 李赛辉, 等. 基于FPGA的雷达目标模拟器设计[J]. 雷达与对抗, 2016, 36(4): 45-48.
- [4] 刘敬兴, 叶春令, 王华. 基于FPGA的脉冲压缩雷达目标模拟器设计[J]. 电讯技术, 2013, 53(9): 1238-1242.
- [5] 薛智远, 彭志刚. 一种雷达目标模拟器设计方法. 知识窗, 2019(4): 120-120.
- [6] 邢依依, 陈伟. 基于FPGA的雷达目标模拟[J]. 电子科技, 2016, 29(4): 161-164.
- [7] 高学利. 雷达目标模拟器关键技术[J]. 电子技术与软件工程, 2017(17): 100.
- [8] 李栋. 一种基于FPGA的雷达目标模拟系统设计[J]. 电子世界, 2020(4): 138-140.
- [9] 石一鸣. 脉冲雷达目标模拟器的设计与实现[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(3): 82-84.
- [10] 王宁. 一种通用雷达目标模拟器设计与实现[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(1): 44-46.
- [11] 刁丹丹, 刘玉杰, 王晓东, 等. 基于DDS技术的三坐标雷达目标模拟器[J]. 现代雷达, 2014, 36(6): 79-81.

Research on Method of Radar Spontaneously Generating Simulated Echo Data

GUAN Yu, DU Yuming, Liu Yi, YE Yingqun

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 601225, China)

Abstract: In the development and production of the entire radar project, due to the difficulty of radar field debugging, if all field test flights are used, the cost is too high and the external factors are too large, but in many cases, it is not easy to debug, so radar target simulation technology has become popular. In radar target echo simulation, there are many ways to generate radar echo simulation data, and it is common to connect an external radar target simulator to generate waveforms. This article introduces the principle of the Cordic algorithm and borrows the Cordic algorithm to design a simpler, more convenient, and easy-to-operate method for radar to spontaneously generate target simulation data. In the FPGA, the target information is superimposed by phase change. This method is convenient for internal use in the project. Without borrowing other hardware, the simulated target echo data can be spontaneously generated in the radar internal FPGA module and sent to the signal processing board to quickly verify the data path and signal. The purpose of the basic functions of processing and data processing, and the effectiveness of this method is verified through simulation and board-ing, and it has certain practicability.

Keywords: radar echo; target simulation; Cordic algorithm; FPGA; spontaneous generation