

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.12.012

引用格式:肖汉波,张长青.基于宽带 DRFM 的雷达面目标回波模拟技术[J].电讯技术,2015,55(12):1378-1383. [XIAO Hanbo,ZHANG Changqing. Radar Surface Target Echo Simulation Technology Based on Wideband DRFM[J].Telecommunication Engineering,2015,55(12):1378-1383.]

基于宽带 DRFM 的雷达面目标回波模拟技术*

肖汉波^{1,**},张长青²

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所,四川 绵阳 621900;
2. 北京经纬恒润科技有限公司,北京 100192)

摘 要:针对跳频雷达高度表大地面目标回波信号的模拟,提出了一种基于宽带数字射频存储(DRFM)技术的实现方案。首先介绍了 1.2 GHz 带宽、3 GHz 采样的宽带 DRFM 组件硬件平台,然后重点叙述了基于 DRFM 技术的雷达高度表大地面目标回波模拟的算法设计方案,通过采用多路并行处理、多相滤波、正交调制等技术实现了数字下变频、目标回波特征调制、数字上变频等关键算法,最后给出了算法仿真和硬件调试结果,验证了算法的正确性和有效性。该方案已成功应用到某宽带跳频雷达高度表大地面目标回波模拟系统的设计中。

关键词:宽带跳频雷达;雷达高度表;面目标;回波模拟;数字射频存储;多相滤波;多路并行处理

中图分类号:TN955 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)12-1378-06

Radar Surface Target Echo Simulation Technology Based on Wideband DRFM

XIAO Hanbo,ZHANG Changqing

(1. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;
2. Beijing Jingwei HiRain Technologies Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract:For the simulation of frequency hopping(FH) radar altimeter's echo signal of ground surface,an implemented solution based on wideband Digital Radio Frequency Memory(DRFM) is presented. First,the DRFM hardware platform with the bandwidth of 1.2 GHz and the sampling rate of 3 GHz is briefly introduced. Second,the design of algorithm for the simulation of radar altimeter's echo signal of ground surface based on DRFM is focused on,and digital down conversion,modulation for the echo signal's characteristics,digital up conversion are implemented by multi-channel parallel processing,poly-phased filtering and orthogonal modulation. Finally, the algorithmic simulation and the results of hardware debugging are shown,which verifies the correctness and validity of the algorithm. This solution has been utilized in the design of the system of wideband FH radar altimeter's echo signal of ground surface.

Key words:wideband frequency hopping radar;radar altimeter;surface target;echo simulation;digital radio frequency memory;poly-phased filtering;multi-channel parallel processing

1 引 言

数字射频存储(Digital Radio Frequency Memory,DRFM)技术通过对雷达信号进行量化、存储、调制和转发,可保留雷达信号的相参性,而且数字信号处理技术的应用使得 DRFM 模拟雷达信号特征更精确、参数设置更灵活,因此,DRFM 已经成为雷达回波模拟和电子对抗的一个重要技术手段。文献[1-3]给出了采用 DRFM 技术实现无线电高度表和

* 收稿日期:2015-04-20;修回日期:2015-07-10 Received date:2015-04-20;Revised date:2015-07-10

** 通讯作者:xiaohanbo@tom.com Corresponding author:xiaohanbo@tom.com

• 1378 •

雷达目标模拟的设计方法,但是模拟雷达信号带宽都只有 MHz 级。文献[4]介绍了雷达目标回波模拟的各种仿真模型和实现方法,文献[5-6]给出了无线电引信回波模拟技术,文献[7]给出了一种具有地面起伏特征的三维场景回波模拟方法,文献[8]介绍了基于实采数据的雷达回波模拟过程。随着雷达和电子对抗技术的发展,为了实现对宽带跳频雷达、捷变频雷达、宽带成像雷达的回波模拟和欺骗干扰,DRFM 组件带宽需求越来越大,采样率越来越高,有的甚至高达 GHz 级,此时如何对 GHz 级的高速数字信号进行复杂目标特征调制就成为了宽带跳频雷达回波模拟的一大难点。

本文给出了一种采用宽带 DRFM 组件实现跳频雷达高度表大地面目标回波信号模拟的设计方法,DRFM 组件的带宽为1.2 GHz,系统采样率高达 3 GHz,通过采用多路并行处理技术实现了大地面目标回波模拟算法,解决了高速 ADC、高速 DAC 与 FPGA 处理速度之间的矛盾。整个算法在 XILINX FPGA 中得到实现,系统仿真和硬件调试结果验证了地面回波模拟算法的正确性和有效性。

2 硬件概述

为实现对宽带跳频雷达的目标回波模拟,本文设计的 DRFM 硬件平台瞬时带宽高达1.2 GHz以满足捷变频雷达跳频带宽1 GHz的要求,系统采样率为 3 GHz。图 1 为1.2 GHz带宽 DRFM 组件的原理框图。

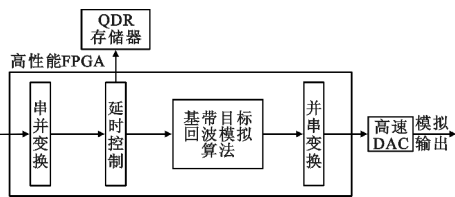


图 1 宽带 DRFM 组件原理框图
Fig. 1 Block diagram of wideband DRFM

整个 DRFM 组件主要由高速 ADC、高速 DAC、高性能 FPGA、QDR 存储器等器件构成,高速 ADC 和高速 DAC 器件的采样率为3 GHz。高性能 FPGA 是 DRFM 组件的核心,主要实现串并变换、QDR 存储器控制、目标回波模拟算法、并串变换等功能。

3 算法描述和实现

3.1 大地面目标回波

大地面目标回波是雷达高度表天线照射波束内

所有散射点回波信号的叠加,该回波信号 $s_r(t)$ 可表示为雷达发射信号 $p(t)$ 与地面响应函数 $h(t)$ 的卷积,即

$$s_r(t) = p(t) \otimes h(t)。$$

式中,系统函数 $h(t)$ 包含了天线波束照射范围内所有散射点回波的延迟、散射系数以及多普勒频率等信息,它可表示为

$$h(t) = \sum_m \left\{ \sum_n A_{m,n} \cdot \exp \left[j \cdot \left(\varphi_{m,n} - 2\pi \cdot \frac{2R_{m,n}}{\lambda} \right) \right] \right\} \cdot \delta(t - \tau_{m,n}),$$

$$A_{m,n} = f(P_i, G_{m,n}, R_{m,n}, \sigma_{m,n}, \dots), \tau_{m,n} = \frac{2R_{m,n}}{C}。$$

式中, m, n 为仿真散射点编号, $\varphi_{m,n}$ 为散射点随机相位, $A_{m,n}$ 表示散射点回波信号幅度(根据雷达方程,它与雷达高度表发射功率 P_i 、天线增益、散射点距离以及散射点的散射截面积等因素有关), $R_{m,n}$ 为各个散射点到雷达的距离, $\tau_{m,n}$ 是不同散射点回波延迟, λ 为雷达载波的波长, C 为光速。

为便于计算,可将雷达天线波束照射区划分成多个距离波门,每个距离波门内包含多个散射点,同一距离波门内散射点信息(包括幅度及相位等)可进行叠加后再与雷达信号进行卷积,因此大地回波系统函数可表示为

$$h(t) = \sum_i h_i(t) \delta(t - \tau_i),$$

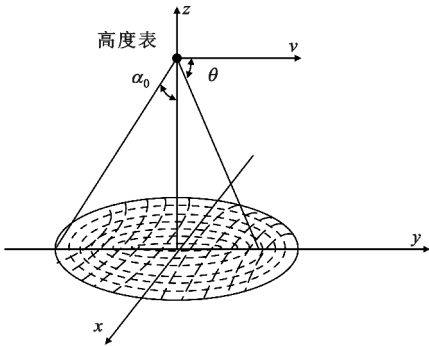
$$h_i(t) = \sum_{p,q} A_{p,q} \cdot \exp \left[j \cdot \left(\varphi_{p,q} - 2\pi \cdot \frac{2R_{p,q}}{\lambda} \right) \right],$$

$$|\tau_i - \tau_{p,q}| \leq \frac{\Delta\tau}{2}, \tau_{p,q} = \frac{2R_{p,q}}{C}。$$

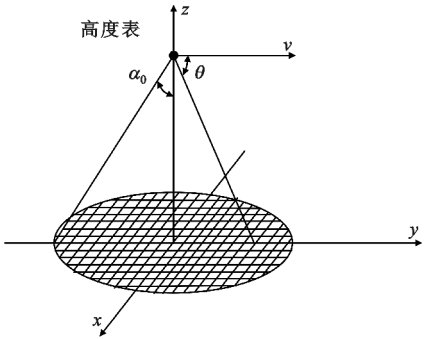
式中, $h_i(t)$ 为处于第 i 个距离波门内所有散射点调制信息(包括幅度及相位等)的累加, τ_i 为第 i 个距离波门延迟, p, q 为第 i 个距离波门内散射点编号, $\varphi_{p,q}$ 为散射点随机相位, $A_{p,q}$ 表示散射点回波信号幅度, $R_{p,q}$ 为第 i 个距离波门内各个散射点到雷达的距离, $\tau_{p,q}$ 是各散射点回波延迟, $\Delta\tau$ 为距离波门宽度, C 为光速。

3.2 地面网格划分

在进行大地面目标回波仿真时,必须先对雷达高度表天线波束照射范围进行网格划分,每个网格按照独立散射点进行回波信息计算,最后对不同散射点回波累加后得到雷达高度表回波信号。通常采用两种方法进行地面网格划分,一种是按照等距离门和等速度门进行划分,一种是按照矩形网格进行地面划分,如图 2 所示。



(a) 等距线等速线划分



(b) 矩形网格划分

图2 地面网格划分示意图

Fig. 2 Grid partition of ground surface

等距线等速线网格划分的优点在于网格划分间隔依据雷达高度表分辨率进行,使得仿真中的计算量降低。其缺点主要表现在一是只适于平整地面仿真,二是忽略了高度表位置的移动,适合对一个处理帧内回波信息的计算。

地面矩形网格划分方法是将地面划分为多个面积相同的正方形网格。这种划分方法的缺点在于计算的网格数比较多,计算量增大。其优点是可适用于地形起伏的面目标回波仿真,同时也便于在高度表运动的连续仿真中使用。本文采用的距离波门划分方法实际上就是一种矩形网格法,通过将处于同一距离波门的矩形网格散射点信息叠加后再和雷达信号进行卷积可以减少计算量。

3.3 算法建模

本设计综合考虑了大地面目标回波模拟算法实现复杂度和仿真逼真度两者的折衷,将雷达天线波束照射区划分成 64 个距离波门,每个距离门内最多有 16 个散射点,故最多可以仿真 64×16=1024 个散射点。大地面目标回波可看成 64 个距离门信息的叠加,每个距离门具有独立的幅度、相位和速度,再分别对输入雷达信号进行调幅、调相和多普勒调制。

基于地面网格划分的多散射点回波模拟算法实

现框图如图 3 所示。

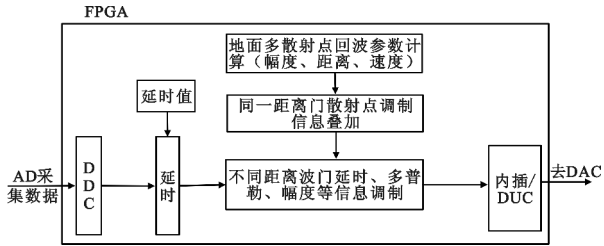


图3 大地面目标回波模拟框图

Fig. 3 Block diagram of echo simulation of ground surface

对于带宽 1.2 GHz 的宽带 DRFM 组件,由于 ADC 和 DAC 采样率高达 3 GHz,而一般 FPGA 处理速度最高仅为几百 MHz,因此,要解决高速 ADC、高速 DAC 和 FPGA 之间处理速度的矛盾,必须在 FPGA 内部采用多路并行处理技术。本文采用了 16 路并行处理,将 ADC 输出的 3 GHz、10 b 高速数据降低为 16 路、187.5 MHz、10 b 的并行数据。

下面对图 3 中的关键模块实现过程进行描述。

3.3.1 数字下变频 (DDC)

数字下变频基本原理如图 4 所示。

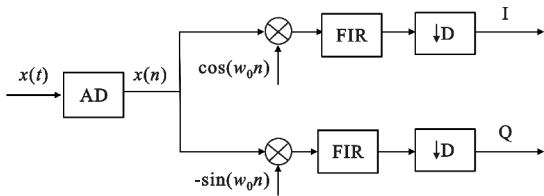


图4 数字下变频原理图

Fig. 4 Principle of digital down conversion

频率变换是一种常用的数字信号处理算法,对于 1/4 信号采样率频率变换,本文采用了一种免乘法器的混频方法来实现。

首先,原始信号 $x(n)$ 进入 FPGA 后,得到 16 路数据,分别用 $d_0, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, \dots, d_{15}$ 表示。然后,对滤波后信号进行下变频。

由于采样率 $f_s = 3 \text{ GHz}$,本振频率 f_c 满足 $f_c = \frac{f_s}{4}$

的关系,而 $n = \frac{k}{f_s}$,故

$$\cos(\omega_0 n) = \cos\left[2\pi\left(\frac{f_c}{f_s}\right)k\right] = \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot k\right) = (1, 0, -1, 0, 1, 0, -1, 0, \dots), \tag{4}$$

$$\sin(\omega_0 n) = \sin\left[2\pi\left(\frac{f_c}{f_s}\right)k\right] = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot k\right) = (0, 1, 0, -1, 0, 1, 0, -1, \dots), \tag{5}$$

则混频后输出结果为

$$d \times [\cos(\omega_0 n) - j \sin(\omega_0 n)] = d \times \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot k\right) - j \times d \times \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot k\right)。$$
 (6)

式中, d 表示输入的 16 路数据 $d_0, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, \dots, d_{15}$, 混频后由于有部分数据为零, 简化后分别得到 8 路 I 数据和 8 路 Q 数据。

3.3.2 多普勒调制

多普勒调制需要产生两路正交的多普勒序列, 通过调用 XILINX IP CORE 中的 DDS 模块就能产生频率可控的正、余弦信号, 取 DDS 输出频率为多普勒频率。

频率控制字 f_{sw} 与输出多普勒信号频率 f_{out} 和参考频率 f_c 之间的关系为

$$f_{sw} = 2^N \times f_{out} / f_c。$$
 (7)

DDS 的频率分辨率为 $\Delta f_{out} = f_c / 2^N$ 。本设计 $f_c = 3 \text{ GHz}$, $N = 32$, 则 DDS 的频率分辨率为 0.7 Hz , 满足最小分辨率 1 Hz 的要求。

多普勒调制就是将 DDS 输出的正、余弦信号与数字下变频后的正交数据 (I_{in}, Q_{in}) 进行复数乘法运算, 得到两路输出数据 (I_{out}, Q_{out}), 如下式所示:

$$I_{out} + jQ_{out} = (I_{in} + jQ_{in}) \times (\cos 2\pi f_d n + j \sin 2\pi f_d n) = (I_{in} \cos 2\pi f_d n - Q_{in} \sin 2\pi f_d n) + j(I_{in} \sin 2\pi f_d n + Q_{in} \cos 2\pi f_d n)。$$
 (8)

将 DDS 产生的多普勒序列和输入的 8 路 I、Q 数据进行复乘, 就可得到叠加了多普勒的调制信号, 经多普勒调制处理后输出信号数据率不变。

3.3.3 数字上变频 (DUC)

数字上变频主要包括内插滤波和上混频操作。由于整数倍内插处理会带来不需要的镜像频率, 因此必须对内插后的信号进行低通滤波。

上变频混频算法可以采用和下变频类似的免乘法器的混频方法, 当采样率 f_s 和本振频率 f_c 满足 $f_c = \frac{f_s}{4}$ 的关系时, 混频计算可以简化处理。

3.3.4 多相滤波

数字下变频中的抽取滤波和数字上变频的插值滤波均为 FIR 低通滤波器, 因 ADC 输出数字信号速率高达 3 Gb/s , 故必须采用多路并行处理方式, 滤波器采用多相滤波结构。

本设计中, ADC 采样率为 3 GHz , FPGA 内部为 16 路并行处理, 单路数据率为 187.5 Mb/s 。FIR 低通滤波器采用多相滤波结构, 如图 5 所示。

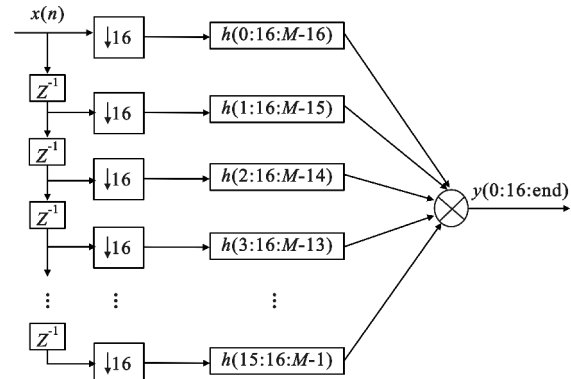


图 5 单路实现的多相滤波结构图
Fig.5 Structure diagram of poly-phased filtering of one channel

3.3.5 不同距离门目标回波信息调制

实现 64 个不同距离门的回波信息调制, 将参与 64 点操作的数据完全独立运算, 分别在数据速率为 $16 \text{ b} \times 8 \times 1.5 \text{ GHz}$ (I、Q 各 8 路, 每路速率为 1.5 GHz) 的每点上实现延迟和信息调制, 由于每一路的采样率为 1.5 GHz , 因此每个距离门距离调节可以达到 0.1 m , 而且设置灵活, 然后将延时后的数据经复数乘法模块累加, 最后将累加结果输出。实现框图如图 6 所示。

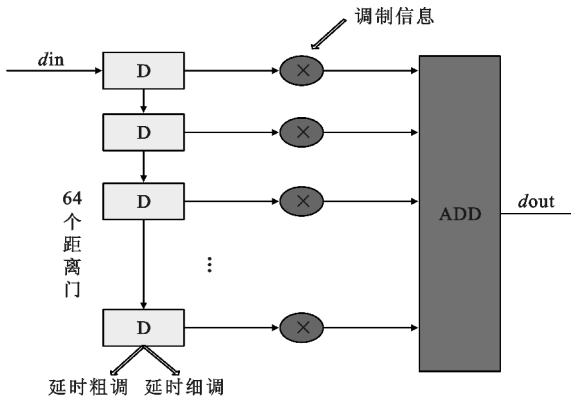


图 6 64 个距离门目标信息调制框图
Fig.6 Block diagram of target information modulation of 64 distance gates

4 算法仿真和实现结果

4.1 基于 SYSTEM GENERATOR 的算法建模和仿真

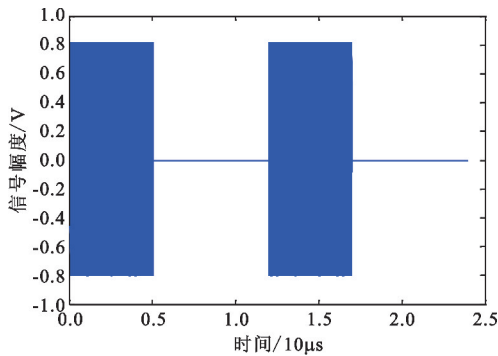
SYSTEM GENERATOR 是 XILINX 公司开发的 MATLAB/Simulink 环境下的一个工具箱, 在用 FPGA 设计数字信号处理系统时, 使用 SYSTEM GENERATOR 可在 MATLAB/Simulink 环境下建立数字信号处理系统的抽象算法, 并在 MATLAB 环境下进

行算法功能仿真,而且自动生成硬件实现时所需的硬件描述语言代码,然后在 XILINX 的 ISE 软件中进行仿真、综合、布局布线、生成目标代码,最终完成算法的硬件实现。

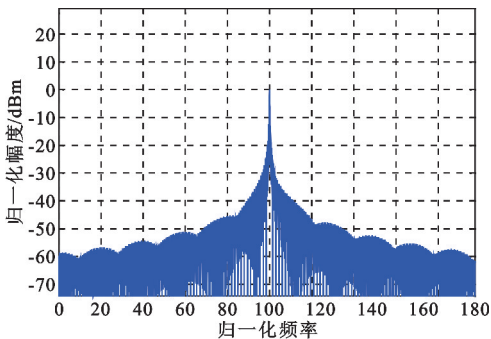
与传统的手写 VHDL 程序进行 FPGA 开发方法相比,使用 SYSTEM GENERATOR 具有三个主要的

优势:第一,图形化操作,简单易用;第二,实现的算法能确保与仿真结果相符;第三,无需为仿真和实现建立不同的模型。

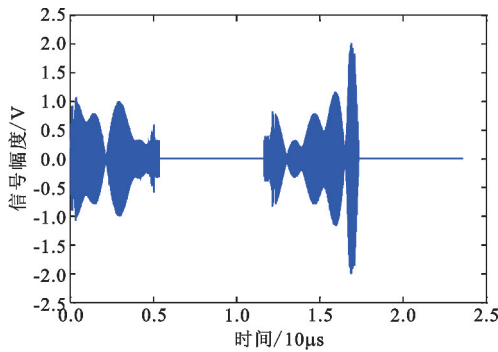
本文采用 SYSTEM GENERATOR 软件在 MATLAB/Simulink 环境下对宽带雷达大地面目标回波模拟算法进行了建模和仿真,仿真结果如图 7 所示。



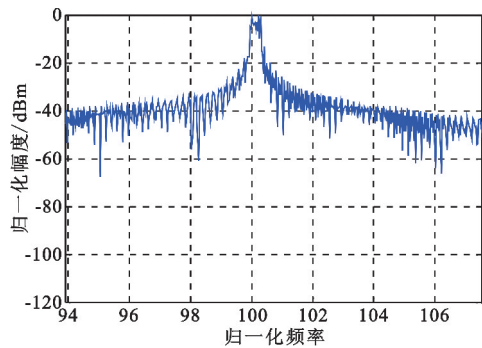
(a) 输入信号时域波形图



(b) 输入信号频域波形图



(c) 输出回波信号时域波形图



(d) 输出回波信号频域波形图

图 7 雷达面目标回波模拟算法仿真图
Fig. 7 Simulation graphs of radar echo signal of surface target

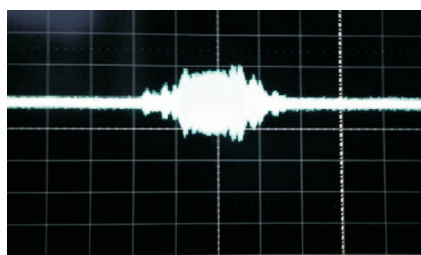
图 7 中,(a)、(b)分别为仿真输入雷达发射脉冲信号的时域和频域波形图,周期为12 μ s,脉宽为5 μ s,频率为1000 MHz;(c)、(d)分别为仿真输出的大地面目标回波信号的时域和频域波形图。由图可见,相比较输入信号波形,输出回波信号在时域上脉冲幅度具有起伏,在频域上信号频谱得到了展宽,反映了大地面目标回波的起伏和展宽特性。

4.2 硬件实现和调试结果

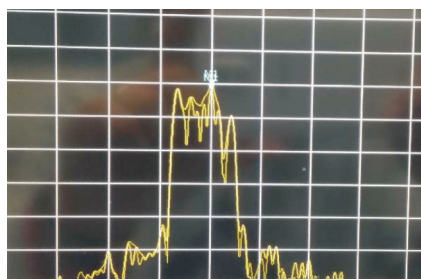
整个算法在 ISE 软件中经过综合、布局布线、目标代码生成等过程,最终用 XILINX 高性能 FPGA 芯片 XC6VSX475T 实现,并下载到1.2 GHz带宽 DRFM 组件上的 FPGA 进行了实验验证。

实验过程设计如下:首先由信号源产生雷达发

射脉冲,频率为1000 MHz,脉宽为5 μ s,周期为12 μ s,接到 DRFM 组件的输入端;然后再将 DRFM 的输出信号分别接到示波器和频谱仪,观察输出大地面目标回波模拟信号的时域波形和频域波形图,如图 8 所示。从图 8 可以看出 DRFM 组件输出回波信号时域具有起伏,频谱有了展宽,并且和图 7 仿真结果类似,反映了雷达面目标回波的起伏和展宽特性,验证了大地面目标回波模拟算法的正确性。图 8 和图 7 输出波形有所差异主要是因为图 7 在仿真时考虑了载体运动和不平坦地貌对回波的影响(脉冲幅度起伏不同),而图 8 则是在硬件实现时做了简化处理,未考虑载体运动且针对的是平坦地貌输出的结果。



(a) 时域波形



(b) 频域波形

图 8 大地面目标回波信号时域和频域波形图

Fig. 8 Time domain and frequency domain waveforms of echo signal of ground surface

此外,为了进一步评估大地回波模拟算法的有效性,本文还将硬件调试结果和某次外场试验中采集的脉冲体制雷达高度表在平坦地貌下的真实回波数据进行了比对,两者在时域和频域波形上都是比较吻合的。

5 结束语

本文介绍了如何利用宽带 DRFM 实现跳频雷达高度表大地面目标回波信号模拟的数字处理方法,通过采用多路并行处理、多相滤波、DDS、正交调制等技术实现了数字下变频、目标特征调制、数字上变频等算法,解决了高速 ADC、高速 DAC 与 FPGA 处理速度之间的矛盾。设计中采用 SYSTEM GENERATOR 软件完成了大地面目标回波模拟算法的建模和仿真,最终用 XILINX 高性能 FPGA 芯片 XC6VSX475T 实现,并给出了算法仿真和硬件实现结果。该算法已成功应用于某带宽跳频雷达高度表大地面目标回波模拟系统的设计中,解决了雷达面目标回波信号的数字模拟问题。

参考文献:

- [1] 李尚生,张军,陈佳林. 基于 DRFM 的通用无线电高度模拟装置的设计[J]. 海军航空工程学院学报,2013,28(2):107-111.
LI Shangsheng, ZHANG Jun, CHEN Jialin. Design of Universal Radio Altitude Simulator Based on DRFM[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University,

2013,28(2):107-111. (in Chinese)

- [2] 李尚生,张军,陈佳林. DRFM 在高度信号模拟中的应用及关键技术研究[J]. 宇航计测技术,2013,33(5):9-12.
LI Shangsheng, ZHANG Jun, CHEN Jialin. Research on the Key Technologies for Applications of DRFM in Simulating Altitude Signal[J]. Journal of Astronautical Metrology and Measurement,2013,33(5):9-12. (in Chinese)
- [3] 刘魁,颜学龙,关世友,等. 基于 FPGA 雷达多目标模拟器 DRFM 设计与实现[J]. 电子技术应用,2011,37(5):52-55.
LIU Kui, YAN Xuelong, GUAN Shiyu, et al. DRFM Design for Radar Multi-Target Simulator Based on FPGA[J]. Application of Electronic Technique,2011,37(5):52-55. (in Chinese)
- [4] 张坤峰,罗杰. 雷达目标回波模拟研究与实现[J]. 舰船电子对抗,2012,35(3):81-85.
ZHANG Kunfeng, LUO Jie. Research and Realization of Radar Target Echo Simulation[J]. Shipboard Electronic Countermeasure,2012,35(3):81-85. (in Chinese)
- [4] 徐榕,韩永金. 引信雷达回波 DRFM 通用化模拟技术[J]. 制导与引信,2013,34(3):14-18.
XU Rong, HAN Yongjin. Generalization Simulation Techniques of Radio Fuse Echo Using DRFM[J]. Guidance and Fuse,2013,34(3):14-18. (in Chinese)
- [6] 冯杰,曹俊,费元春,等. 基于亮点模型的无线电引信回波模拟[J]. 现代防御技术,2008,36(5):32-37.
FENG Jie, CAO Jun, FEI Yuanchun, et al. Missile Radio Fuse Echo Simulation Based on Bright Spot Model[J]. Modern Defence Technology,2008,36(5):32-37. (in Chinese)
- [7] 任三孩,常文革,李建阳. 具有地面起伏特征的三维场景回波模拟研究[J]. 雷达科学与技术,2007,5(5):342-348.
REN Sanhai, CHANG Wenge, LI Jianyang. Raw Signal Simulation Research of Three-Dimensional Scene with Undulate Characteristics[J]. Radar Science and Technology,2007,5(5):342-348. (in Chinese)
- [8] 余贵水,周东瑜,韦有平,等. 基于采实数据的雷达目标回波模拟[J]. 电子设计工程,2014,22(2):22-25.
YU Guishui, ZHOU Dongyu, WEI Youping, et al. Radar Target Simulation Based on Measured Data[J]. Electronic Design Engineering,2014,22(2):22-25. (in Chinese)

作者简介:



肖汉波(1975—),男,江西吉安人,2000年获硕士学位,现为副研究员,主要研究方向为雷达回波模拟、雷达信号处理等;

XIAO Hanbo was born in Ji'an, Jiangxi Province, in 1975. He received the M. S. degree in 2000. He is now an associate researcher. His research concerns radar echo simulation and radar signal processing.

Email:xiaohanbo@tom.com

张长青(1986—),男,河北沧州人,硕士,工程师,主要研究方向为雷达信号处理。

ZHANG Changqing was born in Cangzhou, Hebei Province, in 1986. He is now an engineer with the M. S. degree. His research concerns radar signal processing.