一种Ka波段多通道FMCW SAR数字接收机设计与实现

孔令振[1],王　辉[2],郑世超[1],温　靖[3]
(1.上海航天技术研究院 北京研发中心,北京 100086;2.上海卫星工程研究所,上海 201109;
3.南昌航空大学 信息工程学院,江西 南昌 330063)

摘　要: 调频连续波体制合成孔径雷达(FMCW SAR)因其体积小、成本低、重量轻及分辨率高的优点越来越受到关注。随着软件无线电技术的迅速发展,数字信号处理机在SAR载荷系统中扮演越来越重要的角色。提出一种多通道Ka波段毫米波SAR数字接收机的设计与实现方法,详细分析了FMCW SAR去调频接收过程,研制出一种基于FPGA的多通道数字接收机平台。以三通道为例,采用多类滤波器级联技术,设计系统软硬件,最后通过系统测试及试验验证了方案的正确性与可行性。

关键词: Ka;调频连续波体制合成孔径雷达(FMCW SAR);去调频;三通道;滤波器级联
中图分类号: TN 74　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.06.014

Design and Implementation of a Ka Band Multichannel FMCW SAR Digital Receiver

KONG Lingzhen[1], WANG Hui[2], ZHENG Shichao[1], WEN Jing[3]
(1.Beijing R&D Center, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Beijing 100086, China;
2.Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;
3.School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

Abstract: Frequency-modulated continuous wave synthetic aperture radar (FMCW SAR) has attracted more and more attention, owing to its advantages of small size, low cost, light weight, and high resolution. With the rapid development of software radio technology, digital signal processor plays an increasingly important role in SAR loading system. In this paper, a Ka band millimeter wave SAR digital receiver is presented. The receiving process of de-chirped FMCW SAR is analyzed in detail, and a multi-channel digital receiver platform is proposed based on field programmable gate array (FPGA). Taking three channels as an example, we use the multi-class filter cascade technology to design the software and hardware of the system. Finally, the correctness and feasibility of the scheme are verified by the system test and experiment.

Key words: Ka; frequency-modulated continuous wave synthetic aperture radar (FMCW SAR); de-chirped; three channels; filter cascade

0　引言

基于脉冲体制的成像雷达通常太重或者太昂贵,调频连续波体制合成孔径雷达(Frequency-Modulated Continuous Wave Synthetic Aperture Radar, FMCW SAR)结合调频连续波与合成孔径技术,可使系统变得更加轻小[1]。基于不同的应用背景,许多发达国家较早地投入了大量人力、物力和财力开展关于机载和星载Ka FMCW SAR系统的研制,并获得了令人满意的SAR图像[2]。由于FMCW SAR系统采用去调频的处理方式,可以有效减小回波信号的数据量,使得系统对硬件的复杂度要求降低。目前数字接收机在SAR系统中得到越来越广泛的

收稿日期: 2020-06-16;**修回日期:** 2020-07-18
基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST2017-106)
作者简介: 孔令振(1988—),男,硕士,主要研究方向为电子与通信技术、信息与信号处理。

应用，与传统的模拟接收机相比，数字接收机具有抗干扰能力更强、可靠性更高、处理信号能力更强等优点，在现代电子系统中得到大力推广[3-4]。本文以三通道为例，研究基于现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array，FPGA)的多通道SAR数字接收机技术，用户可根据系统需求实现不同倍数抽取、数字下变频，以及回波数据的块自适应量化(Block Adaptive Quantilization，BAQ)压缩。

本项目中机载Ka波段FMCW SAR系统，根据不同工作模式的要求，系统数字接收机能够处理不同带宽的多种信号。系统采取中频采样技术，选取高速模数转换器(Analog-to-Digital Converter，ADC)完成雷达回波的量化；系统设计时，选取最大带宽所需采样时钟频率，根据系统工作模式输入选取不同的滤波器及抽取因子，实现不同工作模式下的雷达回波接收。

1　系统设计原理

FMCW SAR系统收发天线不间断地发射和接收信号，发射信号占据整个脉冲重复周期，脉冲占空比可达100%。Ka频段FMCW SAR系统发射信号带宽几百兆甚至更高，如采用直接接收方式，其距离向的采样点数将达到几十万点甚至更多。巨大的数据量对数据传输速率和处理速度提出了较高要求，导致系统复杂度增加。本系统采用去调频接收方法，先将回波线性调频信号与参考信号共轭相乘进行调频处理，再完成A/D采集，以降低机载Ka频段高分辨FMCW SAR系统复杂度[5-7]。

系统接收回波线性调频信号，所述回波线性调频信号的表达式为[8-9]

$$s(t)=\exp\left\{\mathrm{j}\cdot 2\pi\left[f_0(t-t_0)+\frac{1}{2}\mu(t-t_0)^2\right]\right\} \tag{1}$$

式中：f_0为信号中心频率；t为距离向时间变量；t_0为从雷达发射信号到接收目标回波历时；μ为调频斜率，$\mu=B/T_\mathrm{p}$，B为发射信号带宽，T_p为脉冲重复周期；$s(t)$为接收回波信号。

系统提供本振信号作为参考，所述参考信号的表达形式为

$$s_\mathrm{ref}(t)=\exp\left\{\mathrm{j}\cdot 2\pi\left[f_0 t+\frac{1}{2}\mu t^2\right]\right\} \tag{2}$$

式中：$s_\mathrm{ref}(t)$为接收回波信号$s(t)$的参考信号。

参考信号与回波线性调频信号共轭相乘得到的信号为中频信号，其中$t_0=2R_\mathrm{i}/c$，R_i为目标斜距，所述中频信号表现形式为

$$\begin{aligned}s_\mathrm{d}(t)=s(t)\times s_\mathrm{ref}(t)^*=\\ \exp\left\{-\mathrm{j}\frac{4\pi R_i}{c}f_0\right\}\exp\left\{-\mathrm{j}2\pi\left[\mu\frac{2R_\mathrm{i}}{c}\right]t\right\}\cdot\\ \exp\left\{\mathrm{j}\frac{4\pi {R_\mathrm{i}}^2}{c^2}\mu\right\}\end{aligned} \tag{3}$$

由式(3)可知，雷达回波信号在时间域里频率与距离R_i成正比，其瞬时频率为$\Delta f=\mu\cdot 2\cdot R_i/c$。因此去调频后，中频信号带宽与测绘带宽度和发射信号调频斜率成正比为

$$B_\mathrm{d}=\frac{2\mu}{c}\cdot R_\mathrm{w} \tag{4}$$

式中：B_d为差拍后中频信号带宽；$R_\mathrm{w}=R_\mathrm{max}-R_\mathrm{min}$，表示在数据采集平面沿视线方向斜距宽度；$R_\mathrm{max}$和$R_\mathrm{min}$分别为主瓣波束内最远和最近斜距[10]。

此时，距离向最低采样率的要求不再由发射信号的带宽决定，而是由中频信号的带宽决定。对于一般的FMCW SAR系统，测绘带内远距点和近距点的回波延时差值远远小于脉冲持续时间，与发射信号相比，去调频操作后的中频信号带宽大幅降低，因此可以根据系统参数合理设置远小于发射信号带宽的中频滤波器带宽。根据奈奎斯特定理，采样率取决于信号带宽，信号带宽的降低显著降低了系统的采样要求和数据率，简化了数据采集电路的设计和系统复杂度。对所述中频信号进行滤波处理，滤波器带宽与目标差拍信号带宽匹配，滤除高频成分，得到目标差拍信号[11]。

本项目设计去调频后，中频信号载波为200 MHz，瞬时带宽为20、10和4 MHz，根据带通采样定理选取160 MHz时钟作为系统采样时钟进行量化。同时由于中频信号频点f_c与采样率f_s满足$f_\mathrm{c}/f_\mathrm{s}=1/4$的关系，因此做正交解调时可直接利用$f_\mathrm{s}/4$混频实现中频到基带的转换。

以瞬时带宽为4 MHz时展开说明。在测绘带时间范围内随机设置3个目标，参考回波时间设置为$t_\mathrm{min}=1.024\mathrm{e}^6/\mu$，目标相应回波参考延时时间为$t_\tau=[-1.1\mathrm{e}^6/\mu,\ 1.2\mathrm{e}^6/\mu,\ 1.3\mathrm{e}^6/\mu]$，仿真输入线性调频连续波回波信号与参考信号混频后，形成中心频点为200 MHz的差拍信号。在输入信号中加入高斯白噪声及一定的直流分量干扰，输入信号如图1所示。由图可知，中频信号频谱在±40 MHz左右存在

回波信号及其镜频,零频附近存在直流干扰[12]。

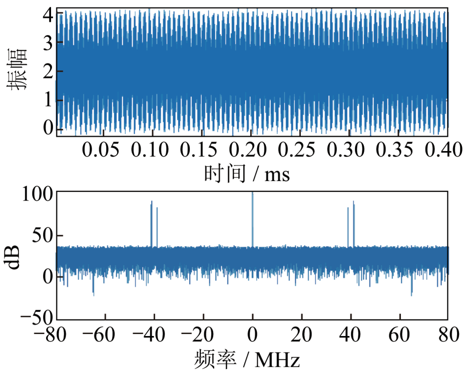


图1 目标回波输入信号

Fig. 1 Target echo input signal

采集信号经过带通滤波器完成滤波,滤除带外可能存在干扰,对滤波后信号进行正交解调得到IQ这2路基带信号,实现中频到基带的转换。然后选取合适的低通滤波器滤除镜频,并根据系统需求选定、抽取不同倍率数据[13]。处理流程如图2所示,信号仿真结果如图3所示。

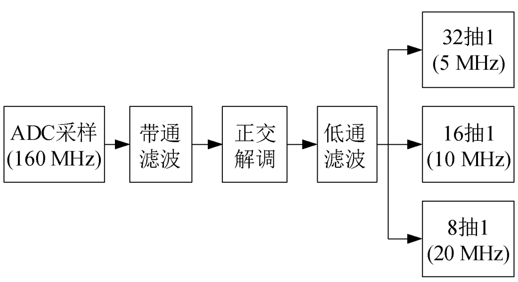


图2 信号处理流程图

Fig. 2 Flow chart of signal processing

2 系统软硬件设计

2.1 硬件设计

该接收机系统主要由ADC采集模块、数据处理模块、电源模块、时钟模块和接口模块组成,整体方案设计框图如图4所示。

数字接收机的硬件设计主要包括3片ADC芯片ADS5463,实现高速模数转换。该芯片为单通道12 bit采样芯片,最大采样率为500 MSPS,无杂散动态范围可达90 dB,有效位数可达10 bit,满足系统需求。由于ADS5463芯片的输入、输出均为差分信号,因此200 MHz中频模拟信号从SubMiniature version A(SMA)接口进入后,通过变压器转为差分信号进入ADS5463,经ADS5463的12对差分输出至FPGA,再进行差分转单端处理。FPGA控制芯片选用Xilinx公司的XC7VX485T系列高性能芯片。其主要特性为:具有48万逻辑单元,37 Mbit内部随机存取存储器(Random Access Memory,RAM),2 800个DSP48E模块,28个GTX(Gigabyte Transceiver)接口模块,14个时钟管理模块(Clock Management Tile,CMT)模块,以及700个HP IO管脚。电源模块为FPGA和ADC提供所需的高精度电源,一次母线经过熔断器和继电器隔离保护后,进入电源模块专用滤波器,然后进入电源模块进行电源变换。二次电源变换电路由滤波器FMH-461F和DC-DC converter模块MTR28512T组成,为系统提供±12 V电源和+5 V电源。ADC模块供电采用TI电源芯片TPS54620和TPS74401,先通过TPS54620将+5 V电源转换成3.6 V电压,再由低压差线性稳压器(Low Dropout Regulaor,LDO)TPS74401为ADC提供所需3.3 V电压。

ADC采集模块主要完成系统模数转换功能,实现3路中频回波数据的数字量化,数据处理模块主要由FPGA完成,实现3路回波数据的数字下变频、滤波、抽取等操作。作为可选模块——BAQ压缩模块,可被用于未来星载系统回波数据的处理。时钟模块主要用于接收外部频率综合器输出的基准时钟和采样时钟,为ADC和FPGA提供系统所需的高精度相参时钟。接口控制模块包含标准422接口(Recommended Standard 422, RS422)、低电压差分信号(Low-Voltage Differential Signaling, LVDS)接口和高速串行接口(High speed serializer/decoder, TLK2711)。其中RS422接口主要用于接收惯性导航装置输出的惯导信息;LVDS接口用以接收工作模式、采样点数等控制信息及载荷系统输出的相关辅助数据;TLK2711接口主要负责将组帧后的业务数据输出到固存中,TLK2711支持传送速率为1.6~2.7 Gbit/s,采用8 bit和10 bit信道编码,用户接口为16 bit,采用交流耦合方式连接。需要注意的是,由于XC7VX485T系列FPGA没有高级别HR bank,只有高性能HP bank,需要在FPGA与TLK2711芯片中间增加电压转换芯片,以完成接口电压转换(FPGA IO电压1.8 V,TLK2711接口电压2.5 V)。电源模块为系统提供高精度的二次电源,本系统ADC与FPGA独立供电,ADC供电主要由线性电源LDO实现。

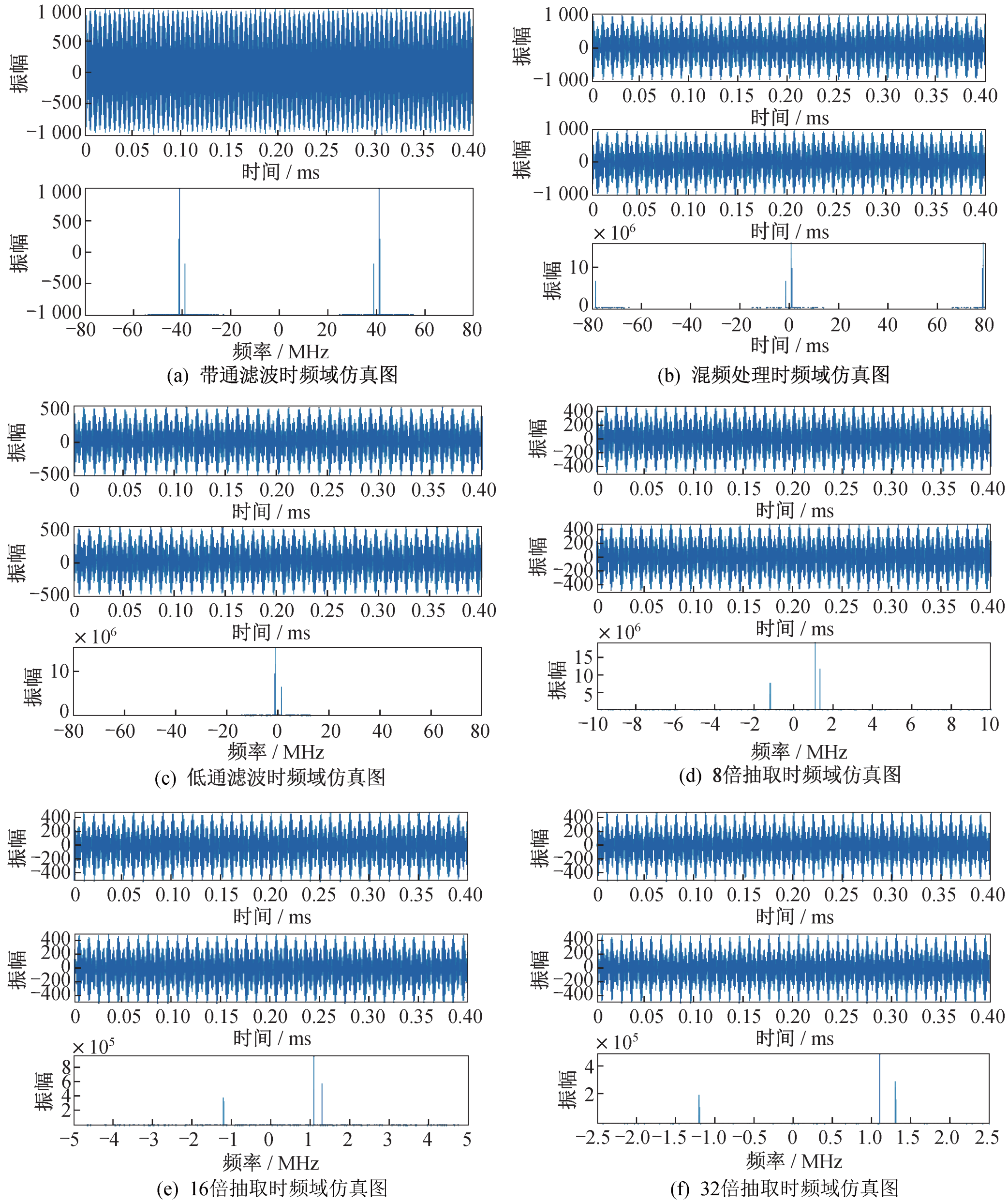


图 3　中频信号处理结果

Fig. 3　IF signal processing results

2.2　FPGA 软件设计

FPGA 作为系统控制芯片，用于采集经 ADC 芯片模数转换的 3 路回波信号，对信息进行下变频、滤波、抽取、BAQ 压缩等处理，最后将生成的数据与从 SAR 系统监控定时单元接收的辅助数据、惯导输入的惯导信息组帧打包，以 TLK2711 协议传给固存单元。依照功能需求，FPGA 软件应主要包含 ADC 接口模块、监控定时接口模块、下变频模块、BAQ 压缩模块及 TLK2711 传输模块。作为连续波采集系统，数据采集、处理和打包过程以流水线方式持续进行。采用的 ADS5463 芯片为单通道，最大支持 500 Mbit/s 采样率，实现 1 路回波数据的实时采集。FPGA 芯片数据获取以 ADS5463 数据使能信号 DRY 作为时钟，其上升下降沿均对应有效数据，即可使用双倍速率(Double Data Rate，DDR)方式采样。在此系统中，3 路 ADC 采集、数据处理及打包上传过程相互独立，以流水线方式及时处理单独 1 路的数据。ADC 接口模块采集数据后，可直接向下变频模块传输数据。每路 ADC 采集回波数据 FPGA 软件架构如图 5 所示。

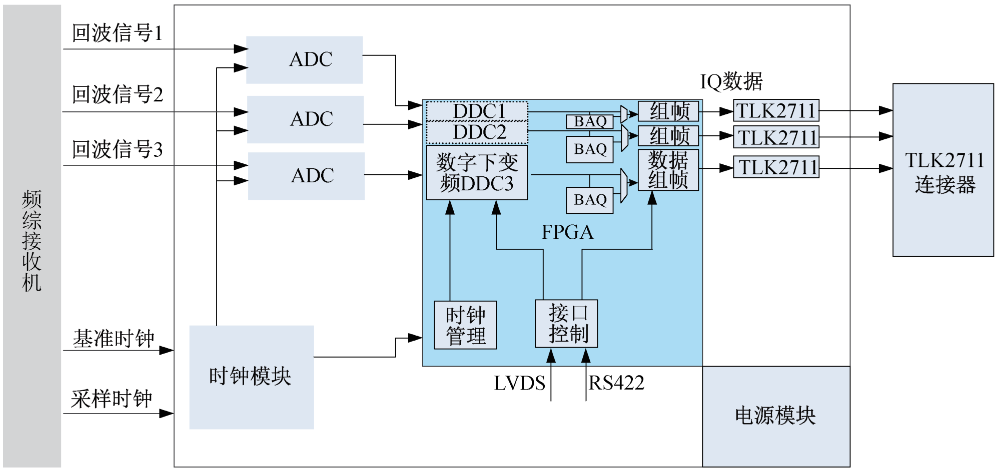


图4　三通道数字接收机实现框

Fig. 4　Realization block diagram of the three-channel digital receiver

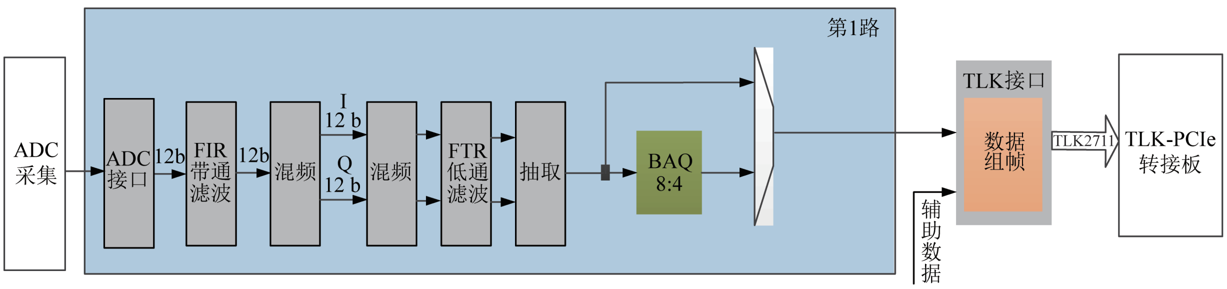


图5　FPGA软件框架

Fig. 5　Framework of FPGA software

ADC芯片用于模拟信号的转换和采集，FPGA根据ADC芯片的时序要求获取数据，对数据进行乒乓式缓存，再输出给后端模块。ADC接口模块上电后开始采集数据，数据以每个脉冲周期时间(Pulse Recurrent Time，PRT)为周期，轮流写入2个先进先出(First In First Out，FIFO)并完成保存，数据采样方式为双倍速率(Double Data Rate，DDR)上下沿采样。DDC下变频模块是由混频模块、抽取滤波模块、有限长单位冲激响应(Finite Impulse Response，FIR)滤波器滤波模块等子模块组成。其中混频模块的功能是将中频信号正交解调成I、Q这2路的基带数据，输入中频信号与混频因子进行相乘处理，分别得到基带I路信号和基带Q路信号。将抽取滤波器设计为多组并行处理，根据输入抽取因子选择不同的抽取滤波器组合，抽取滤波器采用半带滤波与CIC抽取滤波级联设计，以滤除混频后的高频分量和高频杂散信号，防止频谱混叠，减少数据量，FIR滤波器主要滤除带外干扰。中频回波信号载频是200 MHz，采样频率160 MHz。经过AD采样后的中频信号，其中心频率搬移到40 MHz，混频在IQ实现过程中混频因子为：[1，0，−1，0]及[0，−1，0，1]。因此不需要采用DDS产生正弦及余弦因子信号，降低系统设计复杂度和芯片占用资源，同时减小因DDS产生正余弦因子数字化所带来的量化误差[14]。BAQ压缩模块作为可选模块，被用于回波数据的压缩，可将1路输入的I或者Q数据按8:4压缩处理，设计块大小为512个采样点。将输入的数据进行符号位与数据位分离，根据符号位求出每个数据的绝对值；输入数据进行分块处理并统计每块数据的幅度，累加数据绝对值并求得累加器阵列数据的均值；最后对照量化编码值完成位拼接，实现原始数据符号位与查询编码表的输出位拼接，得到最终压缩后的数据，进一步降低数据率。

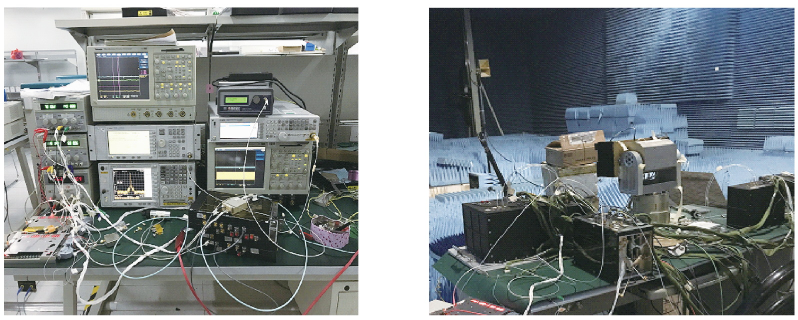
接口控制模块接收来自监控定时单元的命令信息和辅助数据，进行不同工作模式和不同数据处理模式之间的切换。解析命令信息，控制FPGA完成不同工作模式下的数据处理，将接收到的辅助数据和惯导数据传输给后端用于数据组帧，通信接口

包括串行 LVDS 及 RS422 串口。TLK2711 传输模块将处理后的回波数据与从监控定时板传来的辅助数据组帧打包,通过 TLK2711 传送到固存中。

3　系统测试及验证

完成数字接收机软硬件设计及仿真后,需进一步测试并分析系统。将数字接收机连接到 SAR 系统中,频率综合器输出主振信号,经 SAR 回波模拟器完成点目标距离延时,与接收通道内的本振信号混频实现去调频接收,生成点目标回波中频信号。监控定时单元,控制 SAR 系统工作时序,生成周期性脉冲重复信号控制频率综合器输出主振、本振信号和数字接收机采样起始信号[15]。

数字接收机按照监控定时单元输出控制信息,完成回波数据的采集与处理功能。数字接收机在实验室环境下完成各技术指标测试,在暗室环境下接入 SAR 系统,配合 SAR 系统完成系统指标测试验证。测试现场如图 6 所示。

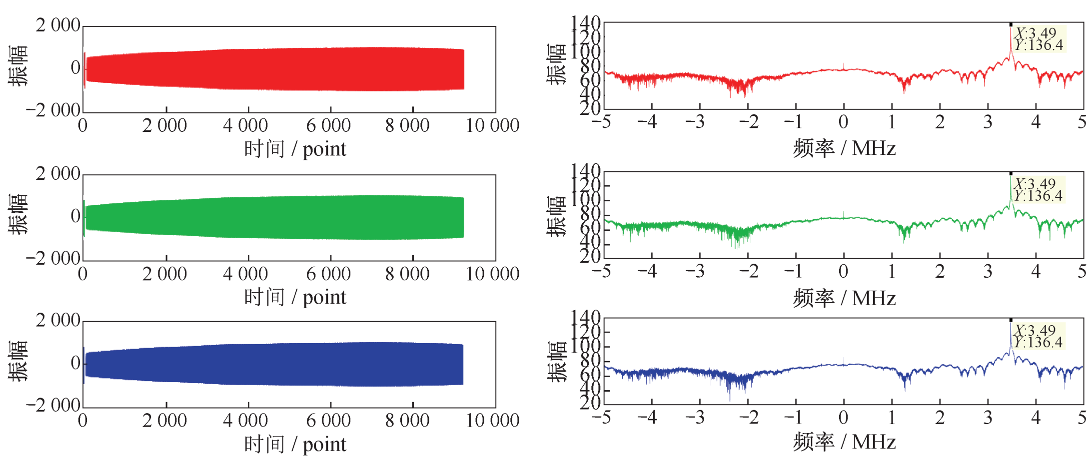


(a) 数字接收机实验室单机测试现场　　(b) 数字接收机暗室系统测试现场

图 6　测试现场

Fig. 6　Test site

将数字接收机处理后的数据存入固存,导入电脑用 Matlab 软件分析。处理后数据时域及频域分析如图 7 所示。点目标回波信号为点频信号,改变回波模拟器距离参数对应频率相应发生变化,符合式(4)中给出的频率与距离关系。可以进一步分析 3 路中频回波数据脉冲间幅度相位关系,验证分析 SAR 系统时序相参性、通道一致性等指标。



(a) 三通道回波时域　　(b) 三通道回波频域

图 7　中频信号处理后时频

Fig. 7　Time domain and frequency domain after IF signal processing

4　结束语

本文以三通道为例,详细介绍了 FMCW SAR 数字接收机,针对目前比较流行的一种成像雷达体制,提出了以 FPGA 为主要架构的数字接收机软硬件设计方案。详细分析了数字接收机设计原理,并提出了具体的实现途径。已将该数字接收机应用

于 Ka FMCW SAR 系统,并成功获取了有效地物回波数据,验证了系统设计的正确性和可行性。该系统具有较好的灵活性和扩展性,可进行软件定制,以适应不同的雷达系统需求。

参考文献

[1] 郑贵文.调频连续波 SAR 概述及其发展趋势[J].现代导航,2012,12(6):445.

[2] 陈筠力,李威.国外 SAR 卫星最新进展与趋势展望[J].上海航天(中英文),2016,33(6):3-15.

[3] 杨媛媛.多通道雷达数字接收机技术[J].电子信息对抗技术,2014,29(2):65-66.

[4] 焦喜香.多通道多带宽 SAR 数字接收机的设计与实现[J].电子技术,2017(5):36-37.

[5] 詹学丽,王岩飞,王超,等.一种用于合成孔径雷达的数字去斜方法[J].雷达学报,2015,4(4):474-480.

[6] 郭鹏程,王晶晶,杨龙顺.雷达地面目标识别技术现状与展望[J].航空兵器,2022,29(2):1-12.

[7] 宋千,梁甸农.宽带线性调频雷达数字去调频直接采样技术[J].现代雷达,2001,12(6):48-49.

[8] 张慧,王辉,潘嘉祺,等.W 波段 FMCW 体制 ISAR 系统成像及试验验证[J].上海航天(中英文),2018,35(6):26-27.

[9] 陈翔,王辉.调频连续波合成孔径雷达滑动聚束成像算法[J].上海航天(中英文),2019,36(5):108-109.

[10] 刘玉立,蔡永俊,张祥坤,等.调频连续波合成孔径雷达系统设计与实现[J].遥感技术与应用,2016,31(2):255-258.

[11] WANG H, JIANG M, ZHENG S. Research on bi-satellite Ka-band FMCW SAR design and imaging [C]// 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR. 2016:1-6.

[12] 杜勇.数字滤波器的 Matlab 与 FPGA 实现[M].2 版.北京:电子工业出版社,2015:87-175.

[13] 米特拉.数字信号处理方法:基于计算机的方法[M].4 版.余翔宇,译.北京:电子工业出版社,2012:297-345.

[14] MEYER U. Digital signal processing with field programmable gate arrays[M].4 版.北京:清华大学出版社,2017:163-197.

[15] WANG H, JIANG M, ZHENG S. Airborne Ka FMCW MiSAR system and real data processing[C]// 17th International Radar Symposium, IRS 2016. 2016:1-5.

(上接第 101 页)

[10] VENETIS J, SIDERIDIS E. Thermal conductivity coefficients of unidirectional fiber composites defined by the concept of interphase [J]. Journal of Adhesion, 2015, 91(4): 262-291.

[11] YUAN Q, BATEMAN S A, FRIEDRICH K. Thermal and mechanical properties of PAN- and pitch-based carbon fiber reinforced PEEK composites [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2008, 21(4): 323-336.

[12] 赵金华,曹海琳,晏义伍.高性能碳纤维表面特性及其对浸润性能的影响[J].高科技纤维与应用,2014,39(2):44-50.

[13] ZHAO M, MENG L, MA L, et al. Layer-by-layer grafting CNTs onto carbon fibers surface for enhancing the interfacial properties of epoxy resin composites[J]. Composites Science and Technology, 2018, 154: 28-36.

[14] YAO X, GAO X, JIANG J, et al. Comparison of carbon nanotubes and graphene oxide coated carbon fiber for improving the interfacial properties of carbon fiber/epoxy composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 132: 170-177.

[15] YUE Z, VAKILI A, DURAN M P. Surface treatments of solvated mesophase pitch-based carbon fibers[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(17): 10250-10260.

[16] PAIVA M C, BERNARDO C A, NARDIN M. Mechanical, surface and interfacial characterization of pitch and PAN-based carbon fibers[J]. Carbon, 2000, 38(9): 1323-1337.

[17] 徐永新,顾轶卓,马全胜,等.几种国产高模碳纤维特性实验分析[J].复合材料学报,2016,33(9):1905-1914.