

# 基于 AD9361 的雷达射频和差模拟器

李伟宗<sup>1</sup>, 马晓冬<sup>2</sup>, 任洁<sup>1</sup>, 刘建明<sup>1</sup>

(1. 太原卫星发射中心, 山西 太原 030012; 2. 华北计算机系统工程研究所, 北京 100083)

**摘要:** 脉冲雷达是我国骨干测控设备, 由于波束窄, 在测控任务中捕获、跟踪一直是其难点。多年来测控技术人员一直对模拟实战训练进行不间断的研究、探索, 传统的射频模拟器均采用上变频模式实现, 设备庞大, 价格昂贵。通过介绍测控设备的基本组成与和差信号在脉冲雷达中的形成过程, 基于实战雷达系统, 采用软件模块实现了上位机系统控制硬件和与雷达设备的信息传输, 采用AD9361射频芯片实现了C波段雷达模拟信号的产生, 通过在雷达设备上的测试验证, 采用软件无线电技术实现C频段射频信号的产生, 解决了设备人员实战化训练手段不足的问题, 进一步提升设备人员捕获跟踪及应急处置能力, 是全面检验设备技、战术性能的重要手段。

**关键词:** 脉冲雷达; 和差差信号; 模拟器; AD9361

中图分类号: TN953

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211631

中文引用格式: 李伟宗, 马晓冬, 任洁, 等. 基于 AD9361 的雷达射频和差模拟器[J]. 电子技术应用, 2021, 47(12): 135–140.

英文引用格式: Li Weizong, Ma Xiaodong, Ren Jie, et al. The simulator of RF sum-difference signal based on AD9361 for pulse radar[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(12): 135–140.

## The simulator of RF sum-difference signal based on AD9361 for pulse radar

Li Weizong<sup>1</sup>, Ma Xiaodong<sup>2</sup>, Ren Jie<sup>1</sup>, Liu Jianming<sup>1</sup>

(1. Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030012, China;

2. National Computer System Engineering Research Institute of China, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Pulse radar is the backbone measurement and control equipment in our country. Because of its narrow beam, it is always difficult to capture and track in the measurement and control task. For many years, measurement and control technicians have been studying and exploring the simulation actual combat training in different ways. The traditional RF simulator is realized by the up-conversion mode, which has huge equipment and high price. This paper introduces the basic composition of measurement and control equipment and the formation process of sum and difference signal in pulse radar. Based on the practical radar system, the software module is used to realize the control hardware of the upper computer system and the information transmission with the radar equipment. C-band radar analog signal is generated by AD9361 RF chip. Through the test and verification on the radar equipment, the software radio technology is successfully realized to generate the C-band RF signal, which solves the problem of insufficient actual combat training means for equipment personnel, further improve equipment personnel tracking capture and emergency disposal ability, is an important means to test the technical and tactical performance of the equipment.

**Key words:** pulse radar; sum-difference signal; simulator; AD9361

## 0 引言

随着我国航天事业的发展, 近年来我国先后装备了一批用于航天工程任务的测控设备<sup>[1]</sup>。这些设备由中心机远程统一管理和调度, 实现设备的组网和自动化运行。在测控任务中, 目标航迹追踪的准确、及时与否, 直接关系到任务的效果。因此, 在日常作战演练中, 针对目标航迹如何进行模拟、仿真也得到了高度的重视。对应的, 一些具有代表性的方法也不断地提出。仿真的有效性一方面取决于对目标特性的刻画, 另一方面取决于对设备特性的分析。目标特性取决于对应的应用场景, 文献[2]~[5]都是以飞机为基础参考物, 提取其参考的空中

目标对应的若干种特征进行的系统仿真。航迹跟踪设备包括对应的预警设备、测控设备等。在测控系统中, 由于发射信号的波束较窄, 其大范围搜索截获能力受到一定限制, 单纯依靠手动搜索发现目标较为困难。为了保证雷达能及时抓到目标并尽早稳定跟踪, 在设计和使用时通常考虑采用数据引导以提高搜索截获效率<sup>[6~9]</sup>。随着设备的使用, 引导的精度需要实时校准。

随着新军事变革的持续推进, 在实际任务中, 测控目标调姿动作多、飞行程序复杂, 跟踪测量难度不断增大, 对设备人员异常跟踪等应急处置能力提出了更高要求, 而现有装备训练手段无法模拟实战场景, 难以满足

训练需求,迫切需要完善实战实训、联战联训的训练条件保障,进行实战化训练设计,模拟实战目标状态以及特点、难点,训练设备人员应急处置和捕获跟踪能力。本文以测控设备为参考基础,基于现有装备工作流程,构建对应的硬件仿真平台,实现射频信号目标航迹信号模拟(和信号、方位差、俯仰差信号),解决设备人员实战化训练手段不足的问题,进一步提升设备人员捕获跟踪及应急处置能力,是全面检验设备技、战术性能的重要手段。

## 1 功能设计

测控设备按照功能可以划分为两个子系统——天线子系统和数据处理子系统。天线子系统主要由射频设备、控制设备和结构设备、基带设备等组成。通过各个设备间协同工作,实现信号发射/接收和目标的跟踪。数据处理子系统主要完成数据解析和计算,包括天线子系统回传的模/数转换数据和中心机回传网络数据。并在上层承接人机交互操作,实现测量参数、状态信息等的展示。

针对天线子系统,其控制部分的自动化运行流程主要基于原来的人工操作流程,包括设备标校、航迹轨道计算、天线等待点计算、目标捕获跟踪以及跟踪结束后天线复位等几大方面。在实际工作中,各个测站中的设备接收设备监控单元(SMCU)指定并分发的工作计划和统一调度信息,完成任务准备、任务开始和任务结束各个阶段。在对应的任务中,设备工作状态包括异步和同步工作过程。在异步工作流程中,设备完成对应的轨道参数、等待点参数等的加载,并完成指向、时间校准,指向等待点等待目标。在该设备任务段内,设备进入同步工作过程,一方面基于时间驱动的工作计划,由天线控制单元(ACU)实现对目标的识别和外测;另一方面由误差网络生成对应的引导信号,实现目标的跟踪。其概略工作流程如图1所示。

在整个工作流程中,如何确保设备能够实时跟踪目标至关重要。雷达跟踪功能主要靠伺服系统完成,典型的伺服系统为模拟系统,其主要工作流程如图2所示。



图 2 伺服系统闭环反馈

中,雷达回波在和、差通道中分别转化成对应的和、差电压后,经过放大、变频等一系列处理流程后,即得到目标相对于雷达指向的方位、俯仰角度偏离的误差电压信号。当和差通道相位移动一致(即  $\Delta\phi=0$ )时,所得到的方位和俯仰角度偏差对应的误差电压与实际的偏离角度完全一致。方位和俯仰误差电压分别送至伺服系统产生驱动电压,按照一定采样频率(工程应用上一般为 20 帧/s)传送到伺服系统中,驱动雷达向减小误差的方向转动,控制雷达电轴不断向目标收敛,直到持续、稳定地捕获目标<sup>[6]</sup>。

以单脉冲雷达为例,其完成和差处理,生成和差波束的核心部件为和差比较器,又称为高频相位环或者和差网络。如图3所示,和差比较器用的较多的是双T接头(魔T)。对应的四个端口分别是: $\Sigma$ (和)端、 $\Delta$ (差)端、1端和2端。单脉冲雷达是依靠和差比较器的作用得到如图所示的和、差波束,其中和波束用于发射、观察和测距,作为相位鉴别器的相位比较基准信号;差波束用于测角。以单脉冲雷达接收信号为例,说明其过程:回波脉冲同时被两个波束的馈源所接收后,其可接收到振幅有

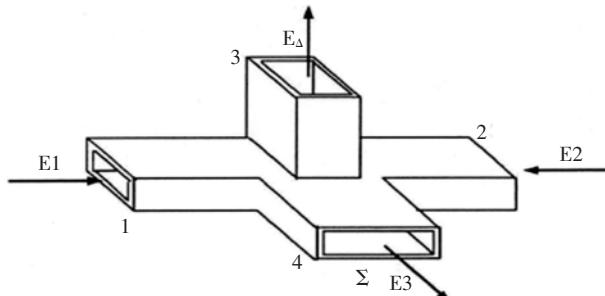


图 3 双 T 和差比较器

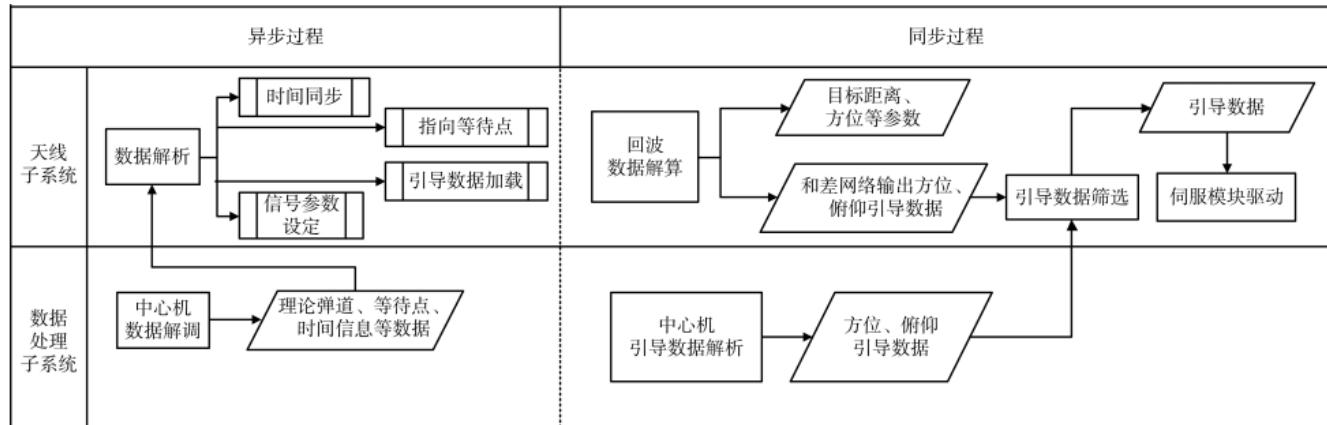


图 1 测控设备工作流程

差异但相位相同的两个波束信号(振幅差异根据目标偏离雷达轴线的程度而定),分别加到和差比较器的1、2端。这时,两信号同相相加在和端完成,并输出和信号。和信号的振幅为两信号振幅之和,相位与到达和端的两信号相位相同,且与目标偏离雷达轴线的方向无关。差端输出差信号的振幅大小表明了目标误差角 $\varepsilon$ 的大小,差信号的相位则表明了目标偏离雷达轴线的方向。

在实际应用系统中,为了实现雷达伺服系统的校验及满足日常训练的需要,往往通过前端端口直接馈入和差差信号,以实现雷达伺服系统的驱动和校准,并且通过对和信号进行特殊变化(频率激变、幅度衰减等),实现操作手训练。

本项目针对C频段测控雷达实现对应和差差信号模拟生成,以满足系统伺服驱动需求和日常训练需求。本系统主要包括上位机模块和模拟信号生成模块两部分。其中上位机模块主要基于输入理论弹道及目前雷达指向信息,生成对应的和差差信号参数。模拟信号生成模块主要借助AD9361芯片,通过接收上位机控制参数,实现模拟信号生成。

## 2 上位机模块

单脉冲测控雷达在实际应用过程中,一方面接收中心机发送的引导参数(理论弹道等),调整伺服指向,实现目标搜索跟踪;另一方面,发送实时指向信息,向中心机标识状态。在本模拟系统中,上位机模块一方面接收中心机发送引导数据,另一方面接收设备指向信息。通过比对,计算天线指向方位差,并基于计算结果实现和差差信号的生成。

图4所示为某单脉冲雷达天线差波瓣示意图,理想脉冲天线的零深对应数值应该为无穷大,但是受到工艺、非线性等因素的影响,实际天线的零深无法达到很大,一般为-36 dB~-39 dB<sup>[10-12]</sup>。

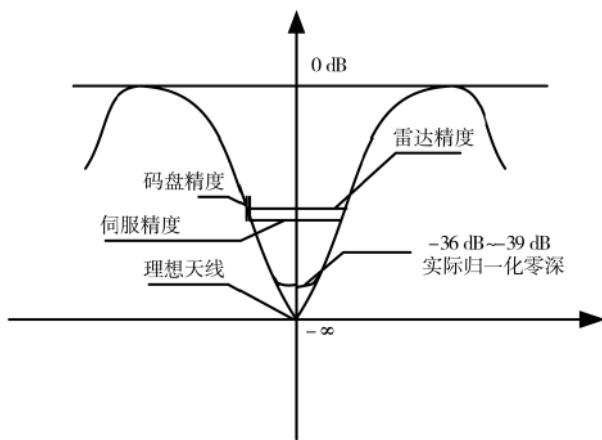
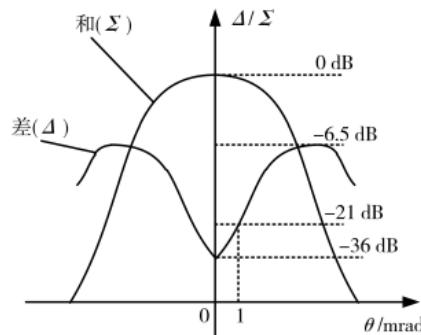
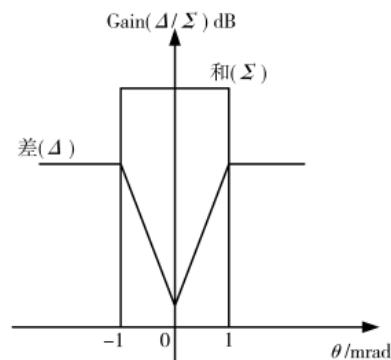


图4 某单脉冲雷达天线差波瓣示意图

图5所示为某单脉冲雷达和差波瓣示意图。根据天线波瓣图,在1 mrad处的和差比为21 dB,归一化斜率为6 dB/mrad。



(a) 和差波瓣增益真实函数图



(b) 和差波瓣增益现行拟合函数图

图5 某单脉冲雷达和差波瓣示意图

上位机模块通过实时解算雷达当前指向和理论弹道数据,计算当前时刻测量值和真实值之间的角度偏差 $\Delta A_t$ 和 $\Delta E_t$ —— $\Delta A_t=A_t-A_t^c$ , $\Delta E_t=E_t-E_t^c$ 。其中 $A_t$ 表示当前时刻理论方位角, $A_t^c$ 表示当前时刻实际方位角; $E_t$ 表示当前时刻理论俯仰角, $E_t^c$ 表示当前时刻实际俯仰角。根据单脉冲雷达工作原理,雷达一旦进入跟踪状态后,天线指向始终处于电轴附近。基于天线方向图,可以用线性关系实现和、差信号幅度计算。以图5(a)为例(取零深为-36 dB),当天线指向偏差为 $\theta=0$  mrad时, $\frac{\Delta}{\Sigma}=-36$  dB。

当天线指向偏差为 $\theta=1$  mrad时, $\frac{\Delta}{\Sigma}=-21$  dB。按照线性拟合 $y=ax+b$ ,可以得到和差信号增益比与天线指向偏差的关系如下所示:

$$\frac{\Delta}{\Sigma} = \begin{cases} -36 + 15\theta, & 0 \leq \theta \leq 1 \\ -36 + 15\theta, & -1 \leq \theta < 0 \end{cases} \quad (1)$$

即当射频前端接收到信号功率为0 dBm的时候,对应的角度差和俯仰差信号即可依据当前时刻天线指向偏差 $\theta$ ,按照式(1)计算对应的信号功率。

## 3 信号生成模块

在上位机模块完成和差差信号幅度计算后,通过串行总线完成信号参数的实时传递。信号生成模块采用软件无线电架构,通过FPGA+AD模块实现与上位机通信

和实时信号生成。其中,AD 模块以 AD9361 芯片为核心。AD9361 射频捷变收发器是一款高性能、带宽大、可编程、支持 I/Q 两路、高集成度的器件。AD9361 把射频前端和灵活的混合信号基带部分集为一体,简化硬件设计<sup>[12~15]</sup>。模拟信号生成流程图和单路信号生成硬件框图如图 6、图 7 所示。

由于 AD9361 的可编程性强、数字分频精确、使用灵活方便并且覆盖 C 频段,相比于传统的射频电路,使用 AD9361 可以大大简化电路的硬件结构,免去搭建高速数模转换和上变频电路以及对应的调试工作。

AD9361 通过与 FPGA 模块通信,将 FPGA 生成的基带信号进行数字化处理并进行数字滤波,并在片内完成上变频,实现 C 频段信号的生成。AD9361 的初始化在主控模块中进行,利用官方给出的初始化结构体分别对 AD9361 参数、接收滤波器、发射滤波器进行初始化。AD9361 参数包括收发频率、发射功率、通信模式、参考时钟频率等。收发滤波器里面的通带频率、截止频率、下降率等参数是由官方提供的 AD9361/9364 滤波器参数设定软件

自动生成的,并基于 Python 完成对应程序调用。最终,信号生成模块架构如图 8 所示。

#### 4 应用结果

根据上位机模块和信号生成模块各自的功能定位,和差信号模拟器通过网络接口与中心机和设备完成实时参数交互。同时,信号生成模块利用同轴线把对应和差信号馈入设备中,完成目标模拟和伺服系统驱动。和差信号模拟器在系统中的级联方式如图 9 所示,信号频谱如图 10、图 11 所示。通过比对和差差信号和雷达伺服运动结果,可以得出对应结论:该和差信号模拟器可以基于现有系统,生成对应的和差差信号,完成设备人员的操作训练和设备性能的检测验证。

#### 5 结论

从实际使用效果来看,和差信号模拟器可用于检验雷达的工作状态和性能,有助于定位一些实际问题,例如在接收系统等设备改造过程中为设备的调机提供了很大的方便。此外,可以进一步在和信号中人为地引入衰减、噪声等参数,实现对操作手的日常训练。

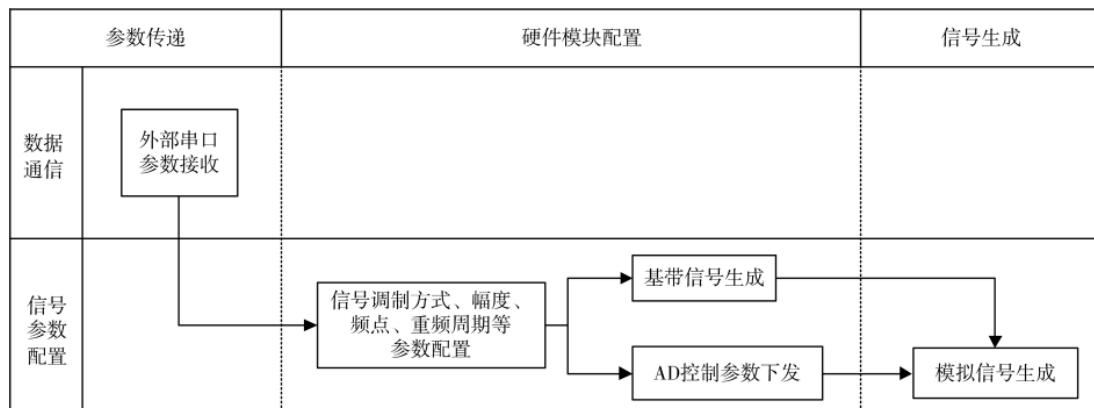


图 6 模拟信号生成流程图

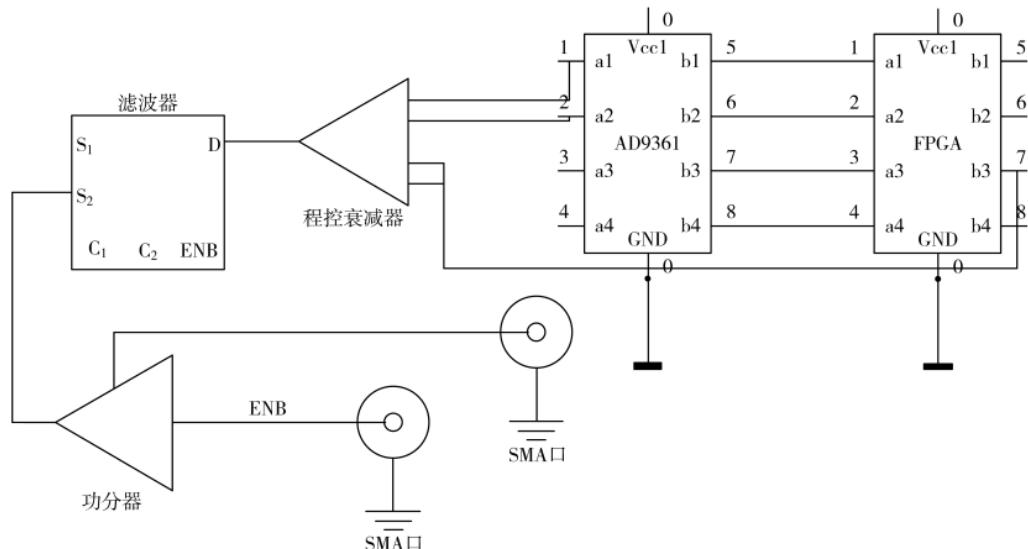


图 7 单路信号生成硬件框图

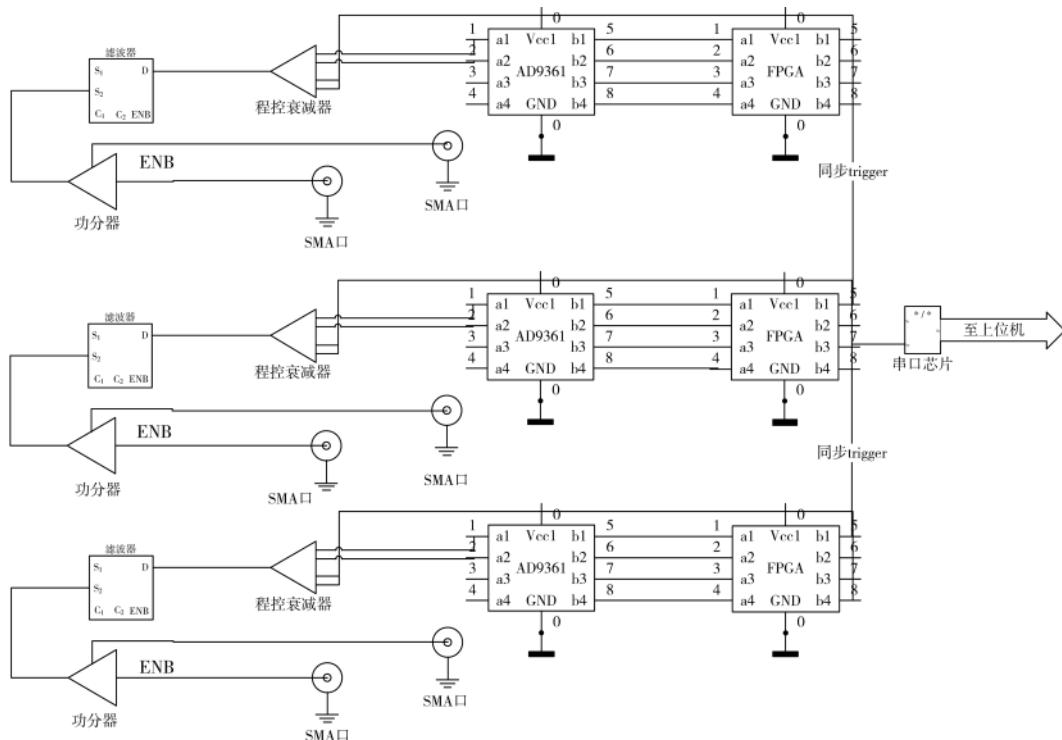


图 8 信号生成模块架构

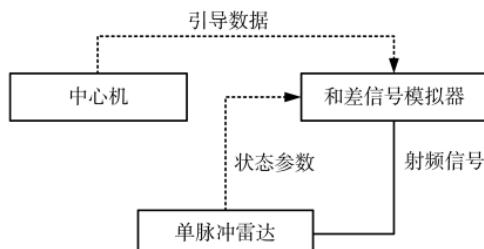


图 9 和差模拟器级联方式

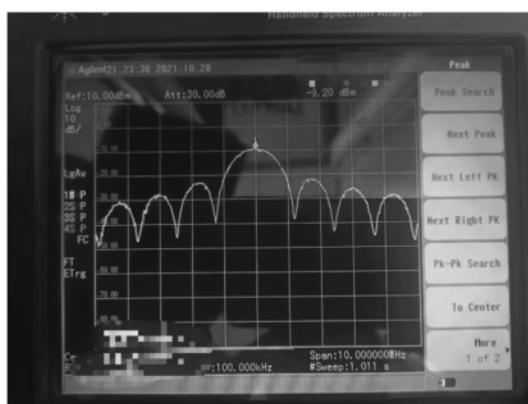


图 10 和通道的单载频频谱图

## 参考文献

- [1] 鲁尽义.航天测控系统测角分系统[Z].西安:中电科技集团公司39所,2006.
- [2] 康凤举.现代仿真技术与应用[M].北京:国防工业出版社,2006.

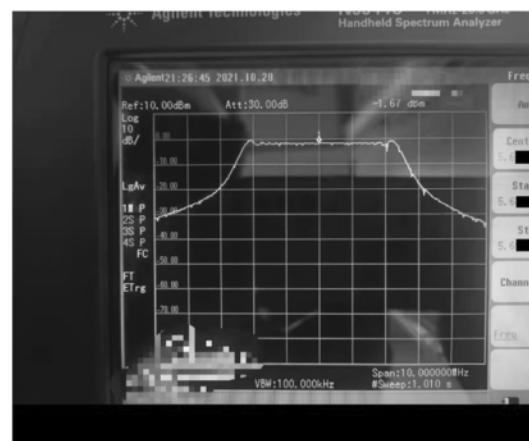


图 11 和通道的连续波载频频谱图

- [3] 胡凯.空中运动目标的特征航迹描述及仿真[J].通信技术,2010,43(5):13-15.
- [4] 苏春梅,冯朝阳,王力军.通用飞机航迹生成技术[J].兵工自动化,2010,29(12):20-25.
- [5] 温包谦,王涛,成坤,等.典型空中目标动态 RCS 特性仿真研究[J].弹箭与制导学报,2020(2):5-9.
- [6] 万其,邵兵,胡芳芳.雷达伺服系统中非线性控制技术研究[J].现代雷达,2010,32(8):70-73.
- [7] 胡德.伺服系统原理与设计[M].北京:北京理工大学出版社,1999.
- [8] 张东云.跟踪雷达天线伺服系统研究[D].兰州:兰州交通大学,2013.

- [9] 文哲.基于 Simulink 的某雷达天线伺服系统性能改进方法研究[J].现代电子技术,2013(3):16~20.
- [10] 袁诚宏,周云德,杨奕飞.船载脉冲雷达目标模拟器精度初步分析[J].电子工程师,2003(10):29~32.
- [11] 卫健,陈定阶.雷达目标模拟器[J].现代雷达,2000,22(1):55~57.
- [12] 袁诚宏,周云德.船载脉冲雷达目标模拟器精度浅析[C]//航天测控技术研讨会,中国宇航学会,2003.
- [13] 吴桐,战兴群.基于 AD9361 射频捷变收发器的 GPS 伪卫星设计[J].电讯技术,2019,59(2):162~166.
- [14] 龚文浩,孙国良,黄智刚.基于 AD9361 的伪卫星信号发射器设计[J].现代导航,2018(1):18~23.

- [15] 韩仕鹏,戴绍港,赵知劲.基于 AD9361 的多调制信号产生[J].杭州电子科技大学学报(自然科学版),2018,38(6):26~31.

(收稿日期:2021-04-13)

**作者简介:**

李伟宗(1977-),男,本科,工程师,主要研究方向:航天测控系统技术。

马晓冬(1975-),通信作者,男,本科,高级工程师,主要研究方向:无线通信,E-mail:13801264530@139.com。

任洁(1992-),女,本科,工程师,主要研究方向:脉冲雷达技术。



扫码下载电子文档

(上接第 134 页)

**5 结论**

本文详细论述了超宽带微封装频率合成器的实现方式,实现超宽带、小型化、微封装、轻量化、高性能频率综合器,在实现 $\leq -60$  dBc 的低杂散指标的同时,相位噪声可达 $-92$  dBc/Hz@10 kHz,且体积只有 $20\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ,达到了高质量频率综合器的设计要求,很好地满足了系统指标要求,具有很好的应用前景。

**参考文献**

- [1] 丁鹭飞,耿富录,陈建春.雷达原理[M].北京:电子工业出版社,2009.
- [2] 何松柏,宋亚梅,鲍景富.频率合成原理与设计[M].北京:电子工业出版社,2008.
- [3] 姚剑清.锁相环技术[M].北京:人民邮电出版社,2007.
- [4] 张凯.宽带低相噪小步进频率综合器[D].南京:南京理工大学,2017:24~49.
- [5] 张文峰,刘武广,宋翔宇.基于多环锁相宽带细步进频率合成器设计[J].电子设计工程,2013,21(6):142~144.
- [6] 张金龙,王雪萍.一种基于电荷泵锁相环的时钟调节电路设计[J].中国集成电路,2021(Z1):79~83.
- [7] 熊豫修.10~18GHz 宽带频率合成器设计研究[D].武汉:华中科技大学,2015:7~47.
- [8] 刘青松,刘亮,范吉伟,等.基波变频技术在频率合成器中的应用研究[J].研究与开发,2016(35):66~69.
- [9] 高晓强,张加程,王增双.低电调电压全集成 10~20 GHz-VCO 的设计与实现[J].半导体集成电路,2021,46:103~106.
- [10] Mu Ning,Guo Hongxia,Gao Wanrong.A study on tunable spectral frequency shift method with low phase noise[J].Optoelectronics,2019,15(3):204~208.
- [11] 曹辉,曲昱.一种高集成小数分频频率源系统设计[J].电子设计与工程,2016,24(10):114~120.
- [12] Ma Xiao,Du Zhankun,Liu Chang.A fractional-N frequency synthesizer for wireless sensor network nodes[J].Journal of Semiconductors,2014,35(12):125003-1~125003-6.
- [13] 王军辉.3D 片上网络扩扑与路由的研究[D].西安:西安电子科技大学,2015:39~48.
- [14] TUMMALA R R.系统级封装导论:整体系统微型化[M].北京:化学工业出版社,2014.
- [15] 杨坦,康吉庆,涂建辉,等.基于 PLL 倍频电路的设计与实现[J].电子工程设计,2017,25(23):105~108.
- [16] 赵雯,尹军舰,赵潇腾,等.PLLFS 快速锁定方法的研究与设计[J].电子设计工程,2017,25(9):162~170.

(收稿日期:2021-03-04)

**作者简介:**

王文凯(1982-),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向:宽带频率合成器设计与实现。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所