

一种毫米波引信测试系统的设计与实现

韩登峰 吴莹

中国空空导弹研究院 河南 洛阳 471009

[摘要]介绍了一种毫米波引信测试系统,它以运用自动化测试的设计思想,采用先进的直接数据频率合成(DDS),能够模拟引信在不同交会条件下的目标回波信号,以及多普勒频率幅度等重要参数的精确模拟。本论文完成了毫米波引信测试系统方案论证、性能指标分析和测试验证,重点是目标模拟器的设计。该测试系统可以用于毫米波引信的内、外场测试,测试引信的启动特性,从而提高引信的研制生产水平,降低成本。

[关键词]毫米波;引信;目标模拟;DDS

[DOI] 10.12252/j.issn.2096-627X.2021.09.1326

1 引言

毫米波引信是综合技术性能良好的一种先进引信体制,即可获得距离信息和锐截至的距离特性,又可获得速度信息,具有良好的对抗地海杂波和背景干扰能力。针对批量生产阶段的引信,需要在装配形成后及对接成全弹前,须对每发产品都进行质量评估,以考核产品是否具备了设计规定的技、战术指标,而测试技术的优劣明显的影响评估结果的正确性。全面先进的测试系统,不但能够最大限度地保证批量生产的产品满足既定技、战术指标,也能最小程度的约束产品的离散性,同时提高效率,降低现场操作工人劳动量。毫米波引信工作时间短、测试项目多,研制一种新型的测试系统,能够满足引信测试流程的自动化和多功能化要求。

2 测试系统功能的需求分析

无线电引信测试系统能够模拟引信的加电过程,通过计算机控制探测器电源的加电时序及相关接口信息加载;能够在不同的环境条件下模拟产生目标的回波信号,包含距离、速度、信号强度信息;能够自动测试探测器的启动灵敏度、截至距离、信号处理时序、执行级及供电状态测试,并在测试完毕后自动形成测试文档;与引信加电时序配合,按照串口RS422信息格式,提供测试需要的RS422信号,并对探测器输出的RS422信息进行解码分析,通过波形或数字显示在界面上。通过测试引信接收系统的时序响应,对整机功能及性能进行评估。测试状态及流程采用计算机程序控制,方便引信状态的快速测试,测试结束后对指标进行合格判定。

3 测试系统关键技术设计

工控机为主要核心,内部配备如I/O、A/D、D/A、422等功能板卡完成弹上电源控制模拟及相关逻辑信号的切换以及部分参数的功能测试。常用的计算机总线技术有USB接口、串口、PCI总线、PXI总线等接口方案。目前国内外基于PXI总线的测试系统已经非常广泛,PXI总线的发展和应用以及相当成熟,PXI总线的高度稳定传输速率以及丰富的外围仪器接口支持,成了控制系统首选的开发平台。

PXI工控机是工控机平台的核心,由计算机、接口控制模块、显示器等组成,其中接口控制模块包括多功能卡、RS422等,工控机通过LAN总线接口与通用仪器间实现工作状态控制、参数设置和测量数据的交换通讯。

引信给出的各种反馈信号,如静态电流等参数,幅度各不相同,不利于后续A/D转换采样,为了方便后续A/D卡的检测,

需要进行信号调理,将输入的电压值控制在同一的范围内,并且为了避免各自通道间的干扰,还需要对部分信号的输入阻抗进行调理。引信目标模拟系统、供电系统、控制系统和测试软件的配合下,来自工控机接口模块的控制信号和电源在信号调理测试单元汇集变换后送往被测引信、微波单元,引信加电,并通过RS422接口预置相关指令给产品(弹上指令),引信发射的微波信号进入目标模拟器,由功分器分为两路信号,功分后OUT1用于功率测试,另外一路信号经过下变频,由目标控制器控制选择目标延迟线中的任一档,以实现弹目空间距离模拟,延时后信号经过可调衰减器后与调制有多普勒信号的本振混频后经上变频至引信工作频段后送回引信。引信对目标回波信号进行判断和分析,用于检测引信的接收机灵敏度和引信的距离截至特性。引信发射机的输出功率和工作频谱测量由频谱分析仪完成;引信的电源消耗、二次电源特性参数由智能化直流电源和A/D卡完成检测;引信的工作噪声、信号时序和波形测量由混合示波器完成,引信的自炸时间由工控机测试软件按照测试时序进行计数测试。各项参数转换为上位机能接收的数字信号,再通过PXI总线送回上位机在屏幕显示出测试结果。

比较常见的多普勒频率调制方案有:

(1) 正交相位调制,其基本设想是:利用宽带射频和低频 90° 精密移相网络获得两种频率的正交信号,再利用两套宽带乘法器,获得两个双边带信号,使其一个边带的相位恰好相同,另一个边带的相位恰好相反,再通过相加器使相位相反的边带抵消,相位相同的边带相加输出。

(2) 锯齿波单边带调制,其基本设想是:采用锯齿波控制相移,即在不同的电压值控制下,移相器的相移量不同,且相移量与控制电压值成正比关系。

(3) 直接数字式频率合成技术(DDS),其基本原理就是基于采样定理,从相位域出发,对参考正弦信号的相位进行抽样,然后得到不同的相位点,通过内部数字计算产生相应的电压值,最后通过数字模拟转换后滤波输出。

目前,DDS技术是较为先进的波形生成手段,与其他方法相比,他的频率稳定高,因为DDS产生信号的频率来自系统时钟频率,而系统时钟的稳定精度可以达到很高的标准;相对频带宽,可以输出 $0.4f_s$ 的频率,而 f_s 为系统时钟频率;频率分辨率高,可达到 $f_s/2N$,N为DDS相位累加器的位数;频率转换速度极快,可以达到ns级;频率转换时相位连续;输出信号频率、相位、幅度可以快速和精确数字控制,可以产生任意波

形且频率切换时相位连续不间断，因此成为主流技术。

4 目标回波模拟器技术设计

目标模拟器是该测试系统的重要组成部分，它用于产生具有目标回波特征的射频模拟信号，包括多普勒频率特征、回波延时特征、回波强弱特征，它要求能够在设备的控制下，定量模拟目标反射信号的距离、速度特征及回波强弱变化等。

输入到输出泄漏主要通过本振之路泄漏，从上图的信号之路可以看出，两级混频器、倍频器、两级滤波器及功分器对信号的抑制可达到90dB以上。为了保证输入信号不超过变频器的动态范围，在下变频器前加20dB衰减器，保证上输入信号不超过变频器的输入信号上限要求；将电调衰减器加在上变频器前端，保证测试时输入信号满足变频器的输入信号的下限要求。

a) 本振单元

本振单元中的参考源1、2、3、4由同一个50MHz参考源产生，参考源采用恒温晶振实现。恒温晶振频率稳定度高，可达到 1×10^{-9} ，相位噪声达 $-145\text{dBc}/\text{Hz}@\text{kHz}$ ，为本振源良好性能打下了坚实的基础。

参考源1锁相振荡源产生450MHz的本振信号，参考源2、3经锁相振荡源产生相差500MHz的两个X波段本振源，经SPDT开关2倍频后送至射频单元，作为上下变频器的本振信号；针对不同型号产品的测试需求，参考源2和参考源3的产生的信号可以进行相应的调整。

目标模拟器具有1GHz的工作带宽，根据实际的使用需要，在本振单元产生两个相差500MHz的本振信号，经2倍频后两个本振相差1GHz，通过在测试界面选择高低本振实现1GHz的带宽。

b) DDS单元

采用DDS技术实现将多普勒信号调制到中频信号，系统原理框图见图所示。

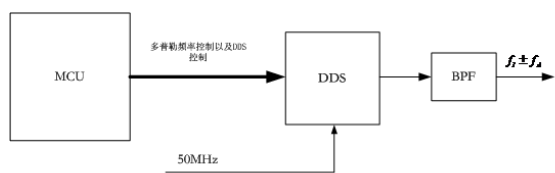


图1 DDS单元原理框图

多普勒信号 f_d 频率： $-450\text{KHz} \sim 450\text{KHz}$ ，中频信号 f_c ： 50MHz 。其中多普勒信号在其频率范围内可选，频率步进为： 1KHz ，共有901个点。在此考虑使用10bit控制字对应不同频率的多普勒信号调制。对应表如下所示。

就现有ADI公司所生产的DDS芯片而言，有几款可供选择的芯片。根据该系统的实际需求，可选择ad9910。该芯片有32位可编程的频率寄存器，频率分辨率可以达到 0.047Hz （系统工作时钟为 200MHz 时），相位累加器19位，截断13位的频率字，可以减少由于相位截断带来的杂散。另一方面，AD9910可以通过外部并行控制端口，方便的实现频率字的累加，从而实现上表中所列出的多普勒频率的改变。

具体实现，计算50MHz的输出频率，频率控制字计算公

表1 控制字对应不同频率的多普勒信号调制对应表

频率控制字 (9bit)	输出频率
000000000	$f_c - 450\text{KHz}$
000000001	$f_c - 449\text{KHz}$
000000010	$f_c - 448\text{KHz}$
000000011	$f_c - 447\text{KHz}$
000000100	$f_c - 446\text{KHz}$
...	...
1110000100	$f_c + 449\text{KHz}$
1110000101	$f_c + 450\text{KHz}$
1110000110~1111111111	预留

式：

$$FTW = \frac{f_o}{f_s} \cdot 2^N$$

N – 相位累加器的位数 (32)

f_s – 系统时钟 (200MHz)

f_o – 输出频率 (50MHz)

$$FTW = (40000000) 16$$

将计算得到的FTW的值写入AD9910的频率控制寄存器中，

然后计算 f_d 所对应的值，将该值经过ad9910的并行数据传输线传给FTW寄存器实现多普勒频率的调制。在此，要解决的关键问题在于，如何实现较小的频率误差。

在控制器上的选择，暂时考虑使用Xilinx公司的Spartan 3E系列的XC3S50来设计。该芯片具有使用方便，设计灵活的特点。

c) 延迟线单元

延迟线单元的实现采用两个单刀六掷开关实现，选择货架产品。

单刀六掷开关的每一路对应要求的一根延迟线，延迟线设计主要是确定延迟线的电长度，根据空间距离所需的延迟时间，射频延迟线选用传输线延迟的办法来实现，选用同轴电缆传输线来实现射频延迟。

5 结束语

本项目经过一年多的工程研制和设计调试，已在整机上联试和使用，通过大量的实验表明，该测试系统工作可靠、高效、智能，满足预定的测试需求。

参考文献

[1] 梁棠文, 防空导弹引信设计及仿真技术 [M], 北京: 中国宇航出版社, 1995.
 [2] 袁正, 孙志杰等编著. 空空导弹引战系统设计 [M]. 国防工业出版社, 2007: 76-85.
 [3] 杨旭, 毫米波引信体目标模拟器的实现 [J], 航空兵器, 2009 (3): 55-58.