

软件化塔康信标模拟系统的设计

李朝阳¹, 张天伟¹, 郑志聪²

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072; 2. 中国航空研究院六一三研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 针对塔康导航系统的测试需求, 结合软件无线电技术, 设计并实现了塔康信号模拟系统; 首先介绍了塔康导航台导航的原理, 包括: 测向原理和测距原理; 接着, 根据塔康导航台信号的特点, 给出信号模拟系统的需求分析; 在需求分析的基础上, 完成了信号模拟系统的总体方案设计、硬件结构组成及软件的模块化设计; 然后, 根据塔康信号模拟系统信号的模块化设计, 对各个模拟信号模块进行详细设计, 并在 GNU Radio 上编程实现; 最后, 搭建了信号模拟系统测试试验平台, 在平台上完成了模拟系统各个信号模块的测试验证, 并对塔康信号模拟系统进行了功能试验验证。

关键词: 软件无线电; 塔康; 信号模拟; 测向

Software Design of TACAN Simulation System

Li Zhaoyang¹, Zhang Tianwei¹, Zheng Zhicong²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. Chinese Aeronautical Establishment, Luoyang 471009, China)

Abstract: This paper designs and achieves the TACAN excitation source using software radio technique, based on the testing need of TACAN (Tactical Air Navigation) system. Firstly, this paper introduces the principle of TACAN navigation, including: the principle of direction finding and ranging. Secondly, the demand analysis is given combined with signal character analysis. Then the general design, hardware structure constitution and software module design are finished based on the former analysis, and a software radio platform—USRP N210 is chosen as hardware application platform. Thirdly, the detail design for each signal module is completed and programed on GNU Radio. Finally, the experiment platform for signal simulation system testing is constructed, and each signal module is verified on the platform, as well as the function of TACAN signal simulation system.

Keywords: software defined radio; TACAN; signal simulation; direction finding

0 引言

我国大飞机工程项目的大型运输机在几年内将要投入批量生产, 为保证装机的 CNS 设备状况完好, 需要提供先进、完善的技术手段, 在实验室对于大型运输机单个机载通信和导航设备进行装机前的全面检测。在总装生产线上对所安装的中 CNS 系统进行系统级在线测试, 以保证系统在飞机上运行正常^[1]。塔康是现代飞机 CNS 系统中重要的一部分, 主要完成测距、测向以及信标台识别的功能。塔康机载设备的测试需要相应塔康信标模拟器的支持, 模拟信标的设计采用较多的是结合硬件的方式。但随着“综合航电”概念的提出, 航电测试系统的对象由原来的单一航电系统变为综合航电多系统。针对单一航电系统的测试设备, 就难以满足综合航电多系统的测试需求。常规的航电设备测试^[2-4]往往需要多个真实机载设备和模拟地面台来提供测试信号, 通常采用手工操作, 自动化程度较低。如通信系统的互通测试需要两个电台的配合, 无线电导航设备的完整测试也需要根据导航设备的不同, 采用不同的模拟地面台提供无线电信号激励等。这些测试方式, 效率较低, 成本较高, 需要真实机载设备也限制了测试系统的应用, 对于先

进的大型运输机和其它军民飞机而言其方法和技术已明显落后, 因此, 需要研究解决不需要真实机载设备, 并应用综合地面台, 通过软件控制来产生无线电信号的方法和技术。软件无线电技术是解决这一问题的有效手段。

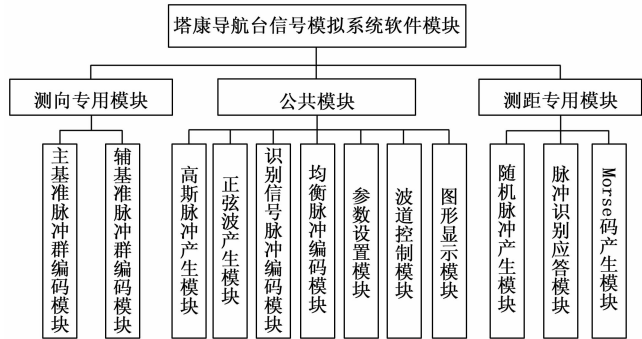
软件无线电技术是近年来在无线电电子领域发展十分迅速的一个研究方向^[5-6]。采用软件无线电技术的模拟航电测试工作过程中的无线电信号其优势主要体现在: ①各类 CNS 系统的信号模拟可以共用相同的硬件平台, 可以降低系统成本。②信号模拟系统的软件可划分为公共模块和专用模块, 而公共模块也是 CNS 各设备信号模拟可以共用的, 降低了新系统的开发难度和成本。③这种采用软件无线电技术的机载通信、导航系统无线电信号模拟是可用软件控制和再定义的。将具有很强的灵活性, 可以通过增加软件模块, 很容易增加新的功能。④信号模拟系统将同时具有较强的开放性, 由于采用了标准化、模块化的结构, 其硬件可以随着器件和技术的发展而更新或扩展, 软件也可以随需要而不断升级。采用软件无线电技术构造的机载通信、导航系统无线电信号信号模拟系统包括一个具有开放性、标准化、模块化的通用硬件平台, 将各种功能, 如工作频段、调制解调类型、数据格式、加密模式、数据通信信号编、解码, 测距信号编、解码, 角度、方位信号测量算法, 波束形成算法等用软件来完成, 是一种具有高度灵活性、开放性的新一代无线电系统^[7-8]。

文章针对飞机塔康导航的测试系统设计, 结合软件无线电技术, 将塔康系统的模拟信标软件化实现, 同时搭载了一个具有射频前端功能的通用硬件平台, 实现了对塔康地面信标台信

收稿日期: 2016-01-16; 修回日期: 2017-02-27。

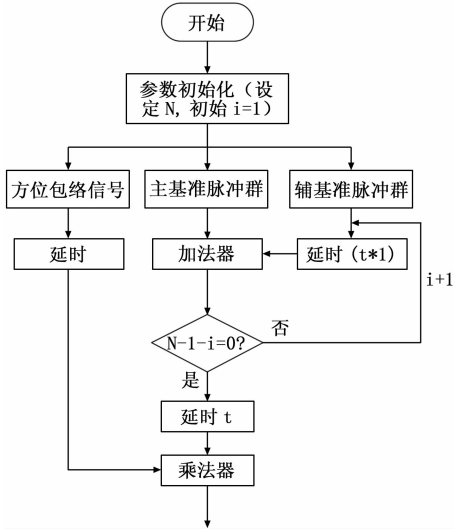
作者简介: 李朝阳(1992-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要从事软件无线电技术方向的研究。

张天伟(1968-), 男, 博士, 副教授, 主要从事机载设备 ATE 设计和飞行品质评估方向的研究。



种功能信号最终都是对射频载波进行幅度调制, 然后以射频脉冲群的形式发射出去。

测向信号是由方位包络信号对调制好的基准脉冲群进行幅度调制得到的, 软件中方位信号详细的设计流程如图 4 所示。



塔康地面台测距包括对机载询问信号的判断和应答信号的延时发射两部分。在发射应答信号的同时, 也发射本台识别码信号。在对测距信号的软件模块划分的基础上, 给出软件设计流程图, 如图 5 所示。

3 模拟信标软件化详细设计

系统软件设计采用 ubuntu 系统下的 gnuradio-companion 软件(简称 grc 软件), grc 软件是一种基于 GNU Radio 平台的开放性软件。

3.1 方位包络信号的设计

塔康方位包络信号是由 15 Hz 主包络和 135 Hz 辅包络调制产生的, 这两个包络都由正弦波产生模块产生, 对信号各自进行调制度设定后, 将两个包络信号相加即产生塔康方位包络信号。由于选用的是无方向形天线发射, 所以采用设定方位包络信号相位来实现方位信息的发射。采取对产生的信号做延时处理来达到设定相位的目的。给出相应的程序设计流程图, 如图 6。

3.2 主、辅基准脉冲群的编码设计

基准脉冲群为机载设备接收解算方位信息提供参考。首先

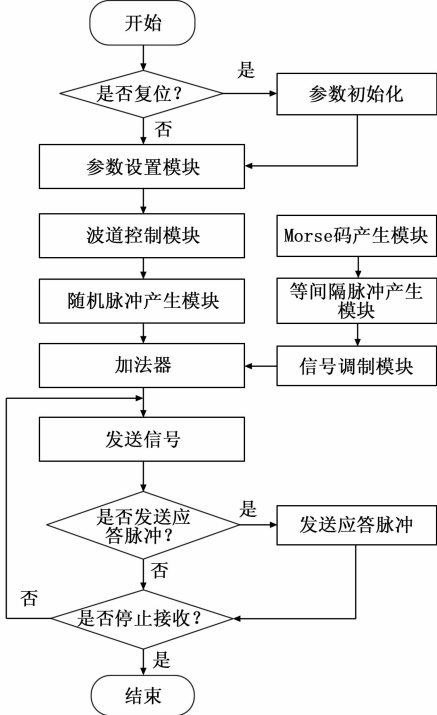
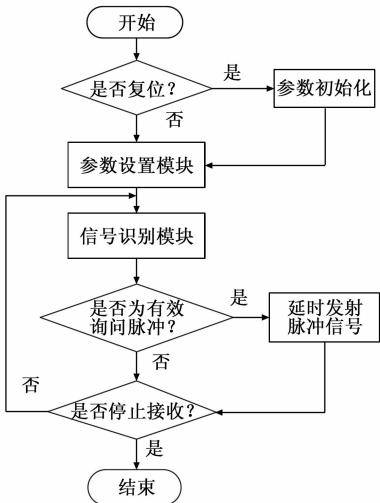
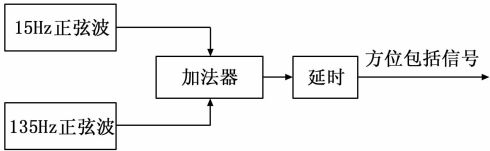


图 5 测距信号软件总体设计



产生高斯脉冲, 由于 GNU Radio 软件中的信号源类里没有产生脉冲的信号源模块, 但是其中矢量模块可以产生幅值为 1, 持续时间确定的矩形波。采用升余弦 FIR 滤波器对矢量源信号进行整形滤波的方案来产生钟形高斯脉冲^[18-19]。虽然相同的基准脉冲群在不同波道中的编码要求不同, 相同波道的不同基准脉冲群的编码要求也不同, 但是整体编码流程类似,

统一给出基准脉冲群的编码流程,如图见图 7。图 7 中, N 为相应基准脉冲群所包含的脉冲(对)数量, t 为响应基准脉冲群要求的脉冲(对)之间的时间间隔。

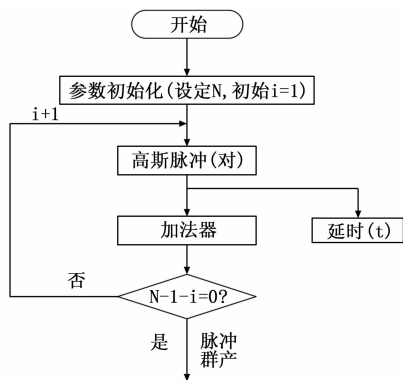


图 7 主/辅基准脉冲群编码的设计流程图

基准脉冲群的产生可以理解为主、辅基准脉冲群在保持时间上同步的前提下相加得到。对于基准脉冲群的产生给出设计流程图,如图 8。图 8 中 $N=9$; $t=1/15s$, t 是脉冲群时间间隔。

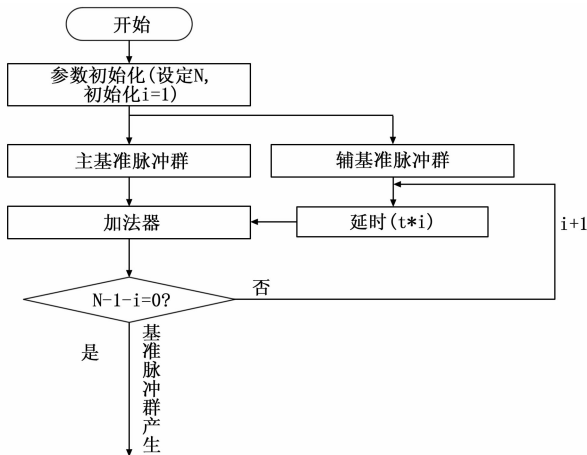


图 8 主辅基准脉冲群设计流程图

3.3 识别与均衡信号的编码设计

识别信号由脉冲间隔对 X 波道为 $12 \pm 0.1 \mu s$, 对 Y 波道为 $30 \pm 0.1 \mu s$ 。其脉冲对重复率为 1350 对/s, 在时间上与主、辅基准脉冲群同步。为了在发射识别信号期间稳定发射机的恒定工作比,并减小系统的方位误差,在每个识别脉冲对定时点之后 $100 \pm 10 \mu s$ 发射一对编码特性相同均衡脉冲对。识别信号脉冲组群的编码方式参考基准脉冲群编码,流程图及程序这里就不再复述。

3.4 译码、编码模块的设计

塔康信号模拟系统在接收到机载询问信号后,会对询问信号进行识别,判断该信号是有效的询问信号后,经过固定延时进而产生相应的应答信号。译码、编码模块设计流程图如图 9 所示。软件采用“触发”机制对询问信号进行处理,当询问信号强度满足设定值时,每个脉冲在检测时都会相应产生一个与矢量源模块输出数据类型一致的序列数“1”;当询问信号强度较弱时,则输出为“0”。将所有脉冲用等幅的序列数“1”表示,归一化了脉冲检测输出。在这个基础上,对检测输出的序

列数进行整形编码,整形编码的方法与基准脉冲群的产生方法一样。

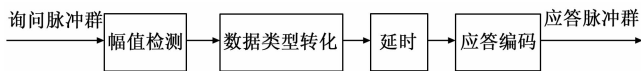


图 9 译码、编码模块流程图

3.5 随机脉冲对的设计

当无询问脉冲时,每秒应发射 2700 ± 90 对随机脉冲对,每秒发射的次数随着询问脉冲数的增加而相应的减少。这里采用随机源结合重复模块,再与周期产生的脉冲对乘积的方法来达到控制随机脉冲对的数量。随机脉冲对设计流程图,如图 10。

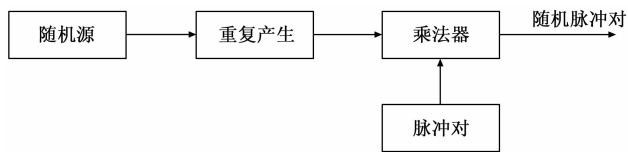


图 10 随机脉冲对设计流程图

4 各信号模块实验和结果分析

实验平台是由设计的塔康信号模拟系统与测试设备组成,如图 11 所示。塔康信号模拟系统由 PC 机和软件无线电设备 USRP N210 以及各自的专用线缆等组成。信号模拟系统的测试验证实验主要借助示波器、数字信号发生器等设备来完成。

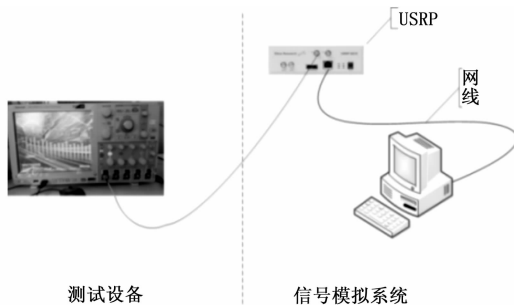


图 11 实验平台构成

4.1 方位包络信号的测试分析

塔康方位包络信号测试主要参数为频率和调制度。通过波形可以测出大包络的周期为 $66.6 ms$, 基本与 $15 Hz$ 的周期一致,从波形上也可以得到大包络与小包络周期 9 倍的关系,从而验证 $135 Hz$ 信号。方位包络信号的周期这一参数基本验证发射的符合要求。图 12 为方位包络信号的测试波形图。

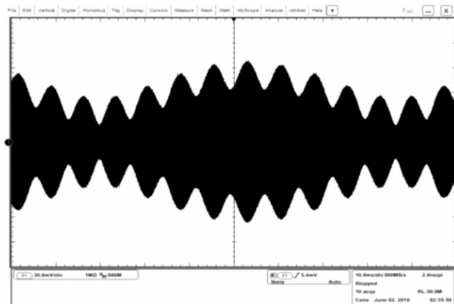


图 12 示波器方位包络信号的波形

4.2 脉冲波形的测试分析

塔康要求的钟形脉冲上升时间为 $2.0 \pm 0.25 \text{ }\mu\text{s}$ ，下降时间为 $2.5 \pm 0.5 \text{ }\mu\text{s}$ ，脉冲宽度是 $3.5 \pm 0.5 \text{ }\mu\text{s}$ ，经示波器接收的高斯脉冲波形如图 13，符合塔康信号要求。

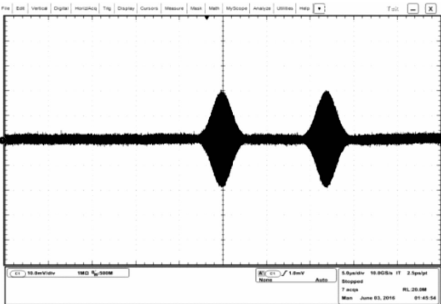


图 13 示波器接收的 X 波道高斯脉冲对波形

4.3 主辅基准脉冲群测试分析

塔康信号基准脉冲群在 X 波道的编码示意图 14 所示。示波器接收到的基准脉冲群如图 15 所示，脉冲个数、脉冲间隔以及脉冲对间隔都符合信号的要求。

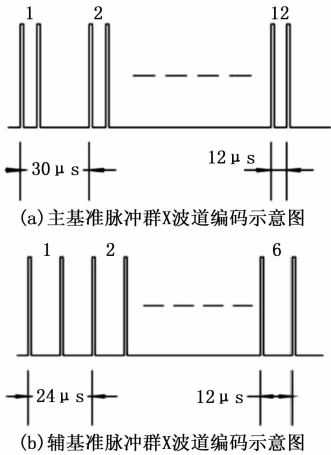


图 14 基准脉冲群在 X 波道的编码示意图

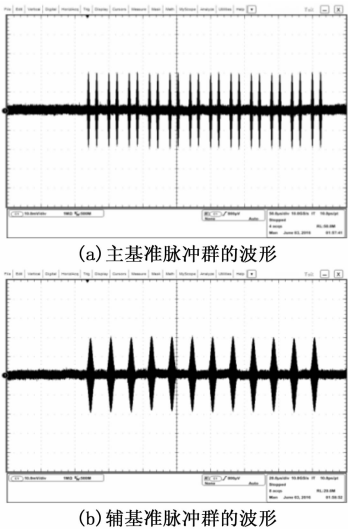


图 15 示波器显示的基准脉冲群的波形

4.4 识别编码的测试分析

这一部分包括识别信号和均衡信号两个信号，对这两个信号的发射后的测试结果如下图 16 所示，从 (a) 图中可以看出脉冲间隔为 $12 \text{ }\mu\text{s}$ ，符合 X 波道脉冲编码。(b) 图可以读出脉冲对间隔为 $100 \text{ }\mu\text{s}$ ，符合均衡脉冲对在识别脉冲对的第一个脉冲发射后 $100 \text{ }\mu\text{s}$ 出现的要求。

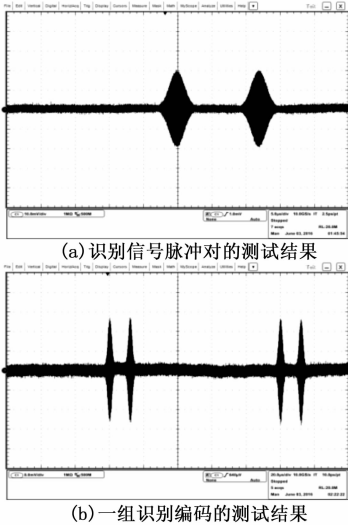


图 16 示波器显示的识别编码脉冲对波形

4.5 随机脉冲对的测试分析

随机脉冲对，顾名思义就是产生时间不定。为了使波形显示清晰，易于观察，以下给出两次发射产生的随机脉冲对的部分示波器接收波形，如图 17。

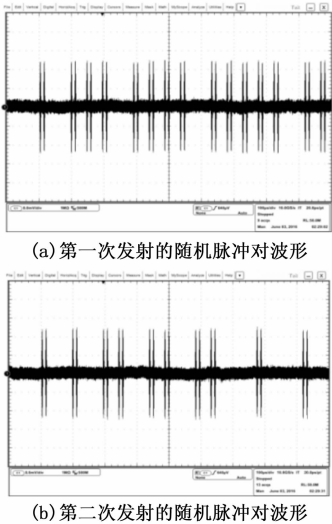


图 17 示波器显示的两次发射的随机脉冲波形

5 系统功能的实验验证

5.1 实验方案的设计

本次试验从测向测试和延迟应答测试两部分实验验证信号模拟系统的测向、测距功能，实验方案如下：

5.1.1 测向功能测试方案

本实验对这两个频率包络信号以及各自对应的基准脉冲群分两次发射，发射前的调制方式改为基准脉冲群与包络信号相加。发射时方位角信息一致。这样通过示波器测量并计算基准

脉冲群与包络信号的重叠点处的角度就能分析计算出方位角，并与设定信息比照。如果计算结果与设定值变化趋势一致，就基本达到实验验证的目的。具体的解算过程为：设程序中设定的方位角为 φ ，接收解算出 15 Hz 信号的方位角为 φ_{15} ，135 Hz 信号的方位角为 φ_{135} 。15 Hz 信号一个周期对应平面空间 360° ，现将 360° 方位划分为每 40° 一个区间，共九个区间，区间与方位角的对应关系如表 1 所示粗测部分确定方位角在哪个方位区间内，精测部分精确测量，二者结合得出最终方位角。对于精测方位角解算，首先确定基准脉冲群与包络信号交叠处包络斜率符号，然后测量交叠处幅值大小，反正弦算出对应的角度，对应表信息，确定精测方位角。将粗测方位角和精测方位角代入式 (1) 中，即可得到最终方位角。

表 1 区间与方位角的对应关系表区间号角度范围

区间号	角度范围 (单位:度)	对应角度 余弦值	角度范围内 斜率符号
1	0~40	0~-0.6428	+
2	40~80	-0.6428~-0.9848	+
3	80~120	-0.9848~-1~-0.8660	先+后-
4	120~160	-0.8660~-0.3420	-
5	160~200	-0.3420~0.3420	-
6	200~240	0.3420~0.8660	-
7	240~280	0.8660~1~0.9848	先-后+
8	280~320	0.9848~0.6428	+
9	320~360	0.6428~0	-

5.1.2 延迟应答测试方案

本程序在接收到询问信号后会设定模拟距离，也就是设定一定的延时，最终将询问信号与应答信号一起发射出去，以便于示波器测量二者之间的时差。限于实验条件，询问信号由软件仿真产生。示波器接收测量延迟时间，然后代入式 (2)，就可以解算出距离。

5.2 实验测试

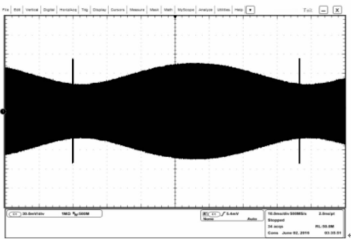
5.2.1 测向功能测试

利用示波器对方位信号的角度信息进行验证。从 15 Hz 包络与主基准波形图可以得到方位角位于第三区间，即在 $80^\circ\sim120^\circ$ 之间，从 135 Hz 包络与辅基准波形图测出精测角度后除以 9，再与 80° 相加即可得到方位角的测量值。如图 18 所示，为方位角设定为 110° 时示波器接收波形图。

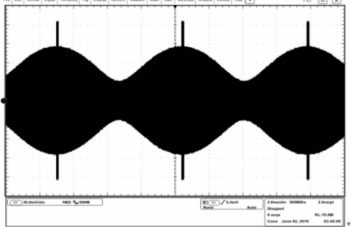
根据解算方法，对每一个区间都取一个角度，各进行 100 次等时间间隔测试，分别解算并求平均值，最后给出误差绝对值。并绘制误差绝对值表，如表 2 所示。

表 2 方位角误差绝对值表

方位角设定值 (单位:度)	100 次测量平值 (单位:度)	误差绝对值 (单位:度)
30	32.1	2.1
70	73.0	3.0
110	106.0	4.0
150	147.5	2.5
190	191.7	1.7
230	232.7	2.7
270	271.0	1.0
310	312.0	2.0
350	346.2	3.8



(a) 110° 时 15Hz 包络与主基准波形



(b) 110° 时 135Hz 包络与辅基准波形

图 18 方位角设定为 110° 时示波器接收波形图

5.2.2 距离应答延迟测试

根据实验方案，利用示波器对发射信号距离应答延迟进行验证。本实验以延迟的时间来代表距离。首先对以脉冲对为仿真询问信号模拟延时 $100\ \mu\text{s}$ 进行测试。X 波道下，地面台从识别询问脉冲到产生应答脉冲。固定延时为 $50\ \mu\text{s}$ ，加上代表距离的时间延迟 $100\ \mu\text{s}$ ，从识别询问脉冲到产生应答脉冲之间时间差应该为 $150\ \mu\text{s}$ ，波形图如图 19。

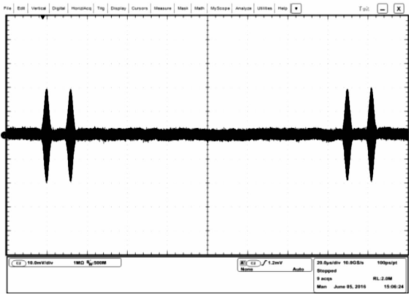


图 19 示波器显示的模拟延时 $100\ \mu\text{s}$ 发射的波形图

塔康测距范围从几十千米到几百千米，取 5 个距离对应时间延迟进行测试，对每个延迟量分别测试 100 次，并求平均值，最后给出误差绝对值。绘制平均误差绝对值表，如表 3 所示。

根据以上测试结果，可以看出，距离应答延迟误差较小，与设定值相差不大，并且误差变化随着示波器分辨率降低而增大，主要是观测误差。而方位角测量结果与设定值偏差略大。对系统以及整个实验过程进行分析，得出造成方位角测量较大误差的原因主要有以下几点：

表 3 应答延迟误差绝对值表

距离设定对应值/ μs	100 次测量平均值/ μs	误差绝对值/ μs
60	61.3	1.3
90	92.5	2.5
120	118.7	1.3
210	211.8	1.8
360	362.3	2.3

3 结束语

采用当前方法对空间基础数据库进行设计与实现时, 无法安全精确地对空间基础数据库进行设计与实现, 存在数据库设计有误差, 空间基础数据运行过程复杂的问题。提出了一种基于 UML 技术的空间基础数据库设计方法。并通过仿真实验证明, 所提方法可以安全可靠地对空间基础数据库进行设计与实现, 是该领域研究发展的重点参考对象, 具有良好的应用价值。

参考文献:

[1] 李运兴, 马 骏. 基于 Hadoop 高性能查询的空间数据库设计与实现 [J]. 中原工学院学报, 2014, 25 (4): 58-63.
[2] 王 琰, 邓永刚. 基于 MapGIS 的区域水文地质图空间数据库设计与实现 [J]. 测绘技术装备, 2016, 18 (1): 62-63.
[3] 马海燕, 李文欣. 城市基础地理空间数据库设计与实现研究 [J]. 科技资讯, 2015, 13 (1): 24-25.

[4] 陈达伦, 陈荣国, 谢 炯. 基于 MPP 架构的并行空间数据库原型

（上接第 164 页）

1) 人为因素。本实验的测试设备主要为示波器。整个操作过程, 尤其是测量幅值的过程中, 波形放大后观察判断数据难以做到准确判断。这是造成测试结果存在误差的一个主要原因。

2) 硬件因素。本系统基带信号的产生和调制都是由软件设计完成的, 调制好的数字信号在经过数/模转换之后, 会有低通滤波器对模拟信号低通滤波, 低通滤波器的相位特性决定了输出信号的相位特性, 这一过程可能会对方位信号的相位造成一定的延迟。

3) 程序原因。本系统脉冲的产生与编码都是软件完成的。GNU Radio 软件中脉冲的生成是对矩形脉冲整形滤波得到的。主、辅基准脉冲群的调制在 vector source 中是以采样点的形式进行的, 主、辅基准脉冲群在周期上不是绝对的 9 倍关系, 随着发射时间的延长, 误差会逐渐累积, 这也是造成误差的原因之一。但是根据对示波器接收波形的较长时间观察, 基准脉冲群与方位包络信号相位关系基本相对不变, 所以这个因素影响应该不是很大。

综上所述, 对信号模块的测试, 验证了信号参数及编码符合塔康导航信号国军标要求。虽然方位测试有略大的误差, 但基本在预期之内, 实验过程及结果基本验证系统的功能。

6 结束语

论文采用软件无线电思想设计实现了塔康系统地面台的信号模拟系统, 通过实验验证了信号模拟系统设计的正确性。既满足了飞机对塔康信号的测试要求, 也符合软件无线电技术思想, 为塔康系统的测试提供了一种新的平台, 为塔康系统设备验收及在生命周期中正常工作提供了重要的保障手段。也为解决飞机航电设备在综合测试和总装在线测试中无线电信号的模拟问题奠定了一定基础; 同时, 这种基于软件无线电技术构建的信号模拟系统, 稍加改造, 也能用于未来新研制或增加机载设备。针对新研制或增加机载设备的开发更多地转到相应的软件的开发和设计上来, 可大大地降低成本。

参考文献:

[1] 徐新丽, 万会兵. 先进通用飞机航电系统概述 [J]. 航空电子技术, 2015 (2): 32-35.

系统的设计与实现 [J]. 地球信息科学学报, 2016, 18 (2): 151-159.
[5] 刘一明, 胡卓玮, 赵文吉, 等. 基于 Geodatabase 模型的扶贫开发空间数据库的设计与实现 [J]. 工程勘察, 2014, 42 (7): 44-49.
[6] 史华林, 何 飞, 王云全, 等. 基于 ArcSDE 和 SQL Sever 城市规划空间数据库的设计与实现 [J]. 江西科学, 2014, 32 (3): 357-360.
[7] 魏振华, 刘志锋, 李金萍, 等. 基于要素扩展管理的海量地质空间数据存储模型的设计与实现 [J]. 计算机应用与软件, 2014, 31 (7): 36-39.
[8] 杜久升, 王 莉, 侯 争, 等. 露天矿卡车调度系统数据库设计与实现 [J]. 金属矿山, 2015, 44 (9): 105-111.
[9] 吴 琰, 唐小明. 基于 HBase 的分布式空间数据库技术 [J]. 吉林大学学报: 理学版, 2016, 14 (6): 1355-1360.
[10] 陈 辉, 赵晓华. 学生上机实训考核系统中数据库设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (18): 4-6.

[2] 李 冰. 导航信号模拟源的研究与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
[3] 刘 祁. 某型飞机航电系统通用测试设备的研制 [J]. 机电工程技术, 2016 (s1): 1-6.
[4] 李 骁. 航电导航设备一体化模拟器研究与设计 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
[5] 杨小牛, 楼才义, 徐建良. 软件无线电技术与应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
[6] Unik Univ, Grad. Software Defined Radio: Challenges and Opportunities [J]. IEEE Communication Surveys Tutorials, 2010, 5 (10): 531-550.
[7] 李 骏. 基于软件无线电信号模拟技术的研究 [J]. 硅谷, 2014 (18): 40-41.
[8] Nambissan T J, Nikhil T V, Vinodkumar V. A VHF Radio for Software Defined Radio Applications [J]. Procedia Technology, 2016, 24: 820-826.
[9] 梁 晶, 张 允, 彭德强. 塔康信号模拟器的设计 [J]. 舰船电子对抗, 2014 (1): 109-112, 120.
[10] 周振国. 塔康系统关键技术与塔康测位的实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
[11] 吴 苗, 朱 涛, 李方能, 等. 无线电导航原理及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
[12] 焦守波, 李 乐. DME 系统在飞机导航中的应用 [J]. 中国科技信息, 2016 (16): 40-41.
[13] Li S, Ni Y, Cai N. Optimal strategy of DME beacon distribution for DME/DME area navigation [J]. 2012, 3: 2036-2039.
[14] GJB 914-90, 塔康系统信号要求和测试方法 [S]. 中华人民共和国国家军用标准 1991.
[15] 陈通海, 李景春, 郑 娜, 等. 基于 GNURadio 和 USRP2 的未知信号检测 [J]. 无线电工程, 2012, 42 (12): 16-19.
[16] 张 鹏, 孙福余, 徐亚明, 等. 基于 USRP 平台的 GPS 软件接收机设计与实现 [J]. 测绘通报, 2012 (11): 55-58.
[17] Gandhiraj R, Soman K P. Modern analog and digital communication systems development using GNU Radio with USRP [J]. Telecommunication Systems, 2014, 56 (3): 367-381.
[18] 曹健辉. 基于软件无线电的多通道宽带数字信号处理系统的实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
[19] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现 [D]. 北京: 清华大学出版社, 2003.