

# 雷达高度表灵敏度测试系统的参数化设计方法

刘振吉<sup>1</sup>, 高世鹰<sup>2</sup>, 冉启友<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 计算机应用研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 提出了一种参数化设计方法, 实现了雷达高度表接收机灵敏度的自动化测试, 提高了接收机灵敏度的测试效率和测试准确度; 利用计算机程序通过 GPIB 协议控制直流稳压电源、信号源、示波器等标准仪器, 实现了雷达高度表的加电和断电、雷达回波信号的模拟、雷达高度表输出端信号的检测; 针对测试需求, 充分考虑接收机灵敏度测试方案的通用性和可扩展性, 设计了通用的测试模型, 据此开发的软件可自动给出测试结论; 在程序中设计了求取灵敏度最优频点和灵敏度的优化迭代算法, 节省了测试时间; 利用数据库技术对被测雷达高度表相关信息和测试数据进行管理, 便于将测试结果与历史数据进行比对。

**关键词:** 雷达高度表; 接收机灵敏度; 自动化测试; 参数化

## Parameterized Design Method for Testing System of Radar Altimeter Receiver Sensitivity

Liu Zhenji<sup>1</sup>, Gao Shiyong<sup>2</sup>, Ran Qiyu<sup>2</sup>

(1. Institute of Computer Application, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A parametric design method is put forward, which made it possible to automatically measure receiver sensitivity of radar altimeter. It improved the receiver sensitivity test efficiency and test accuracy. Using a computer program through GPIB protocol control standard instrument such as DC regulated power supply, signal generator, oscilloscope, to turn on or off radar altimeter, to simulate radar echo signal, to detect radar altimeter output signal. According to test requirements, fully considering the receiver sensitivity test scheme for universal and scalability, a general test model is designed. The software is developed which can automatically giving the test results. A program designed to calculate the sensitivity of the optimal frequency and sensitivity of the optimal iterative arithmetic, which save the test time. Test data and information of the measured radar altimeter are managed by database technology, which make it easy to compare the result of the test with the historical data.

**Keywords:** radar altimeter; receiver sensitivity; automatic measurement; parameterization

## 0 引言

雷达高度表是利用电磁波传输特性实现高度测量的电子设备, 因其测高准确度高、受天气影响小、实时性好, 被广泛应用于飞机、导弹等武器装备领域。而其工作环境复杂多变, 对电子系统的可靠性要求高<sup>[1]</sup>, 接收机灵敏度是表征雷达高度表接收能力的重要参数, 需要定期测试, 便于及时发现和排除问题<sup>[2]</sup>。以往依靠技术人员手动操作仪器来完成灵敏度测量, 不仅耗时久, 而且由于操作人员的技术水平、责任心和工作经验的差异常常影响检测结果的准确性<sup>[2]</sup>。随着自动化测试技术的发展, 不少单位开展了接收机灵敏度自动化测试的研究工作, 在测试效率和测试结果一致性方面都有很大提高<sup>[3-7]</sup>, 但是对自动化测试的通用性和测试数据的管理很少考虑。采用参数化设计方法, 实现自动化测试系统的通用化。

## 1 测试原理及参数化

接收机灵敏度是雷达高度表正常工作时接收机组件可接收的最弱信号强度, 通常用功率表示, 单位为 dBm。理论上接

收机灵敏度应针对接收频带内每一个频率点都有一个阈值, 工程上只对中心频率点的接收机灵敏度进行测量, 因为据此可判断接收频带内的接收能力。此外工程上对不同高度的测试能力即接收机灵敏度会有不同要求, 因为高度越低, 灵敏度要求也越低, 通常在设计雷达高度表时针对低高度不会为了提高灵敏度而增加技术复杂度。

接收机灵敏度的传统测量方法一般采用标准信号源法和噪声系数法, 采用标准信号源法时如果用功率计直接在接收机输入端测量输入的功率值, 就会存在难以准确测量的问题<sup>[5]</sup>。采用具备可设置功率衰减的标准微波信号源来模拟接收机输入端的回波信号, 可以解决此问题, 改进的信号源法测试原理连接框图如图 1 所示。

图 1 中主控计算机与采集控制卡之间通过 PCI 总线连接, 与示波器、信号源、程控直流稳压电源之间通过 USB-GPIB 转接电缆和 GPIB 电缆连接, 其它通过测试电缆与雷达高度表相关输入输出接口连接。

通过软件调节信号源频率, 并判断示波器检测到雷达高度表的视放输出信号最强时, 记住频率值。然后以此频率设置信号源, 按一定衰减幅度调节信号源功率, 当雷达高度表处于临界输出状态后继续调节, 直至信号强度小到雷达高度表不输出为止, 此时信号源的上一步进输出幅度, 加上微波通路的衰减

收稿日期: 2015-12-04; 修回日期: 2015-12-22。

作者简介: 刘振吉(1974-), 男, 山东潍坊人, 硕士, 副研究员, 主要从事自动化测试系统的研究与应用方向的研究。

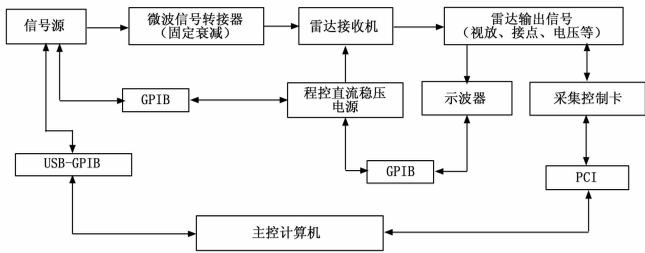


图 1 接收机灵敏度测试原理框图

量，即为接收机灵敏度。

上述过程中的各相关量和求优过程在程序设计时实现参数化，该方法可以用于不同型号的雷达高度表的接收机灵敏度测试。

## 2 硬件设计

测试系统在硬件上必须尽量覆盖不同型号雷达高度表的测试需求，所以仪器的选型、连接通路的设计、输出信号采集电路的设计都要便于整个系统实现参数化设计。

### 2.1 仪器选型

根据拟测试的雷达高度表型号特点，选择能覆盖测试需求的信号源、示波器和程控直流稳压电源。信号源的选择要考虑频率范围及设定时间、电平范围、宽带噪声、支持的调制类型和支持 GPIB 连接等；示波器的选择要考虑带宽、通道数量、触发方式、输入阻抗、最大输入电压、最大存储量和支持 GPIB 连接等；电源的选择要考虑最大输出功率、输出电压范围、路数、纹波特性、读回值准确度和支持 GPIB 连接等。

### 2.2 微波信号转接器设计

微波通路的连接相对复杂，需要串接环行器、隔离器、定向耦合器、衰减器和匹配电路等。为方便使用和通用化设计，设计一款微波信号转接器将上述组件集成在一起，并封装成独立器件。微波信号转接器如图 2 所示。



图 2 微波信号转接器示意图

具体技术要求如下，部分参数数值用 X、Y 统一代替：

- 各端口功率容量为峰值功率 XW 或平均功率 YW，特性阻抗均为 50 Ω，驻波系数不大于 1.3，频率范围满足要求。
- 各端口对传输方向要求：小信号（-XdBW - YdBW）从端口 2 输入并从端口 1 输出；大功率信号（脉冲峰值功率 XW，平均功率 YW）从 1 端口输入并从端口 4 输出，并同时耦合其中部分能量从端口 3（耦合输出）输出，此时，不允许 1 端口中大于 XmW 的信号从端口 1 进入端口 2。
- 各端口相对隔离度要求：正向：2→1：≤X dB；1→3：X dB±0.4 dB；1→4：X dB±0.4 dB；反向：1→2：≥X dB，其余上述各端口反向隔离不小于 Y dB。

## 2.3 采集控制卡设计

采集卡主要用于采集雷达高度表的终端输出等信号，由于不同型号雷达高度表的终端输出信号类型不同，有的是接点信号，有的是 TTL 电平信号。为实现参数化通用化设计，基于 PCI 总线研制了一款带有 8 个继电器输出及 8 路隔离数字量输入卡，提供 2 500 VDC 的隔离保护；继电器可以用作开关控制式电源断路开关，每个隔离输入都同时支持干接点和湿接点信号。

## 3 软件设计

该方法是在被测对象的技术指标已知的前提下开展测试工作，因此在频点确定和灵敏度测试过程中，通过参数设置缩小求优范围，提高效率。

### 3.1 软件总体结构

软件采用参数化设计，基于数据库技术，将软件程序和参数分开。主控软件用 Visual C++ 开发，数据库编程技术采用 ADO。LabVIEW 编程调用 VISA 接口库来实现对示波器、信号源、程控直流稳压电源的控制，并封装成动态库供 Visual C++ 调用。对采集控制卡的控制 Visual C++ 通过其驱动程序来实现<sup>[8]</sup>。

### 3.2 测试流程参数化

由测试原理及方法可知，灵敏度测试流程中需要设置与被测雷达高度表及测试仪器设置相关的一些物理量：雷达高度表相关物理量有测试灵敏度的高度、灵敏度合格范围、频率初始值等；信号源设置相关物理量有信号延时初始值、脉冲宽度值、频率搜索上下限、设置时间间隔、起始功率值、功率步进值等；示波器设置相关物理量有显示通道、触发通道、光标初始位置等；程控直流稳压电源设置相关物理量有输出通道、电压值、电流保护限值等；采集控制卡设置相关物理量有输入通道号、是干接点还是湿接点、判断是否动作的参考值、输出继电器号、动作值等。

对这些物理量进行参数化，用数据库管理起来。换一种型号的雷达高度表，只需要将与之相关的物理量参数增加进数据库中相关的参数表即可。程序运行时根据被测雷达高度表的型号信息，从参数表中调用该型号对应的测试参数表记录、仪器设置表记录等，自动执行相关的测试流程，给出测试数据和是否合格的结果。

### 3.3 数据库设计

测试参数和测试数据都需要利用数据库技术进行管理，下面以产品信息表、测试参数表和测试数据表为例简要介绍数据库结构设计。

表 1 产品信息表结构

| field name   | data type | is null | explain |
|--------------|-----------|---------|---------|
| order        | smallint  | no      | 序号      |
| proudetnum   | char(20)  | no      | 产品编号    |
| productname  | char(30)  | no      | 产品名称    |
| manufactnum  | char(20)  | no      | 出厂编号    |
| type         | smallint  | no      | 型号      |
| manufacturer | char(20)  | no      | 生产厂家    |
| madetime     | char(20)  | no      | 生产时间    |
| remark       | char(30)  | yes     | 备注      |

表 2 测试参数表结构

| field name | data type | is null | explain      |
|------------|-----------|---------|--------------|
| order      | smallint  | no      | 序号           |
| type       | smallint  | no      | 型号           |
| th         | int       | no      | 测试高度 m       |
| Pt         | float     | no      | 测试通路衰减量 dBW  |
| Smin       | float     | no      | 灵敏度合格下限 dBW  |
| ss         | float     | no      | 灵敏度搜索步进值 dBW |
| f0         | float     | no      | 频率初始值 MHz    |
| fd         | float     | no      | 频率偏差 MHz     |
| fs         | float     | no      | 频率求优收敛差值 MHz |

表 3 测试数据表结构

| field name      | data type | is null | explain    |
|-----------------|-----------|---------|------------|
| order           | int       | no      | 序号         |
| prouductnum     | char(20)  | no      | 产品编号       |
| testsensitivity | float     | no      | 灵敏度测试值 dBW |
| ifok            | smallint  | no      | 是否合格       |
| tester          | char(20)  | no      | 测试人员       |
| testtime        | char(20)  | no      | 测试时间       |
| testremark      | char(30)  | no      | 测试地点(温湿度)  |

3.4 频点确定算法

根据测试原理, 接收频带内对应终端视放信号以最优频点为中心最大值成左右对称分布。最优频点  $f$  肯定在频率初始值  $f_0$  的上下偏差  $f_d$  范围内, 否则被测产品肯定不合格。用  $S(f)$  表示频率设置成  $f$  时对应的示波器视放信号值, 采用二分法求优<sup>[9]</sup>。频点确定算法流程图见图 3。

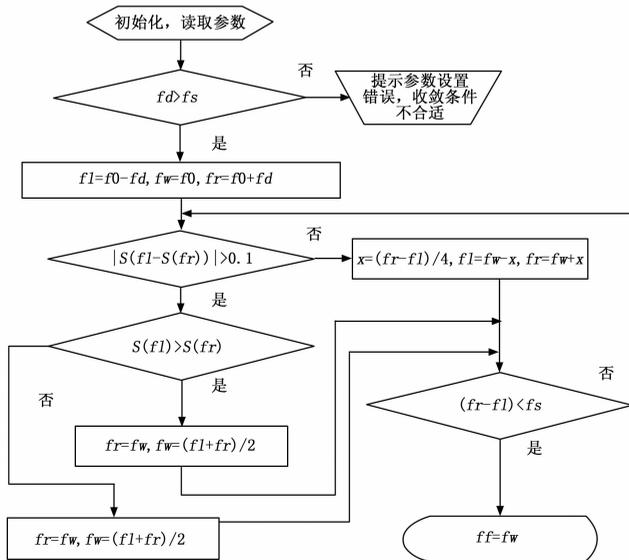


图 3 频点确定流程框图

3.5 灵敏度测试算法

根据测试原理, 接收机灵敏度  $S$  可以从合格下限值  $S_{min}$  开始搜索, 优于  $S_{min}$  为合格, 否则为不合格, 根据测试高度  $th$  计算出信号源的延迟时间  $t$ , 根据  $S_{min}$ 、通路衰减  $Pt$  计算出对应的信号源功率  $P_0$ 。每次信号源功率设置值用  $P_x$ , 雷达终端

输出信号用  $O(P_x)$  表示, 有稳定输出为 TRUE, 反之为 FALSE。灵敏度测试算法流程图见图 4。

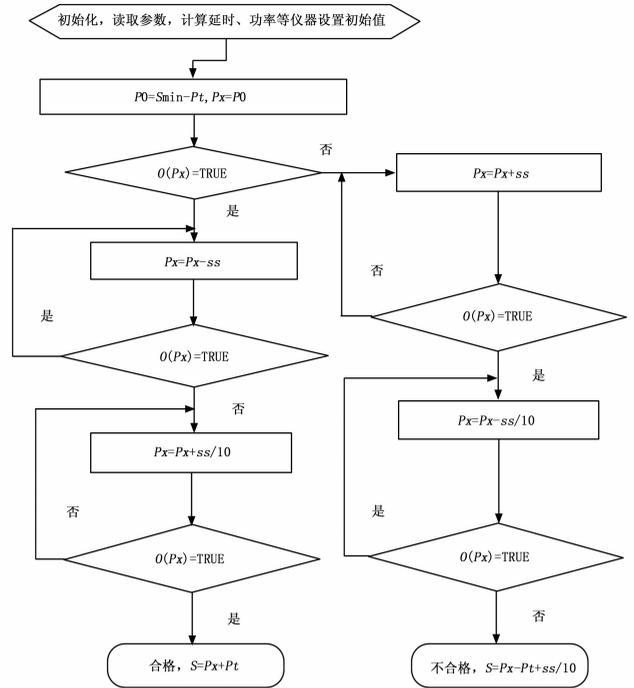


图 4 灵敏度测试流程框图

4 应用情况

参数化设计方法已经在某项目中得到了成功应用, 基于该方法研制的测试系统实现了对 4 种型号雷达高度表的灵敏度测试。

对 4 种型号多台雷达高度表进行了超过 100 次的灵敏度测试实验, 实验结果表明测试效率有了明显提高, 同型号测试数据一致性好。不考虑测试前的准备时间, 原来手工方式下测量单台雷达高度表灵敏度, 因操作人员不同测量时间为 10~15 min, 而采用新研测试系统进行测量, 单台测量时间不超过 5 min。

5 结论

采用参数化方法实现雷达高度表灵敏度自动化测试, 不仅减少了人工操作引入的测试误差, 而且具有较好的通用性和可扩展性。不用重新编写程序, 只需在参数表中增加相关记录、新研部分测试电缆, 即可扩展应用于不同型号雷达高度表灵敏度测试, 大大提高了测试系统开发效率。提供的历史测试数据管理功能有利于相关技术人员及时掌握被测产品的性能变化情况, 便于提出预防性维修计划。通过频点确定求优算法和灵敏度测试求优算法, 提高了测试效率, 降低了测试人员的劳动强度, 保障了测试数据的客观性。此外这种用最优频点灵敏度判断接收机性能的检测方法值得探讨, 应该用最差频点灵敏度表征整个接收频带内的接收能力才更合适。

参考文献:

[1] 郭明明, 李成玉, 尚朝轩, 等. 雷达状态监测系统设计 [J]. 中国测试, 2013, 39 (6): 107-109.

### 3.2 打靶仿真效果分析

设目标位置为 (20 000 m, 0, 0)，在 30°射角下，分别在无控模式和采用落点预测导引模式下各进行 1 000 次蒙特卡洛打靶试验，算例引入的干扰和误差因素范围及分布模型如表 1 所示。

表 1 仿真误差因素取值范围及分布模型

| 序号 | 误差因素          | 分步 | 均方差(1σ) |
|----|---------------|----|---------|
| 1  | 射角误差(deg)     | 正态 | 0.3/3   |
| 2  | 射向误差(deg)     | 正态 | 0.3/3   |
| 3  | 俯仰发射扰动(deg/s) | 正态 | 0.3/3   |
| 4  | 偏航发射扰动(deg/s) | 正态 | 0.3/3   |
| 5  | 气动拉偏(/)       | 正态 | 10%/3   |
| 6  | 质量偏差(kg)      | 正态 | 1/3     |
| 7  | 发动机推力偏差(N)    | 正态 | 50/3    |
| 8  | 发动机推力偏心角(N)   | 正态 |         |
| 9  | 平面风(m/s)      | 正态 | 10      |
| 10 | 水平定位误差(m)     | 正态 | 10      |
| 11 | 高度定位误差(m)     | 正态 | 15      |
| 12 | 水平定速误差(m/s)   | 正态 | 0.3     |
| 13 | 垂直定速误差(m/s)   | 正态 | 0.4     |

表 2 落点散布 CEP

| 状态     | 均方差 $\sigma_x$ | 均方差 $\sigma_z$ | $R_{cep}$ |
|--------|----------------|----------------|-----------|
| 无控火箭   | 274m           | 125m           | 231m      |
| 落点预测导引 | 35m            | 19m            | 31m       |

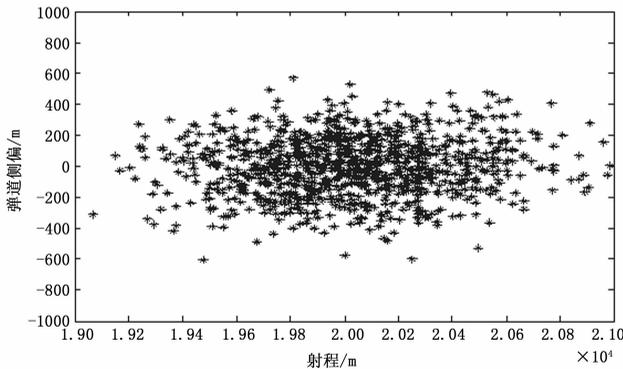


图 4 无控落点散布图

从图 4~5 可以看出，采用落点预测制导律对火箭弹进行修正后，落点密集程度明显高于无控模式。从表 2 知，采用落点预测制导律的圆概率偏差 CEP 为 31 m，相比无控明显降低。由仿真结果可知，采用落点预测制导律可大幅减小落点散

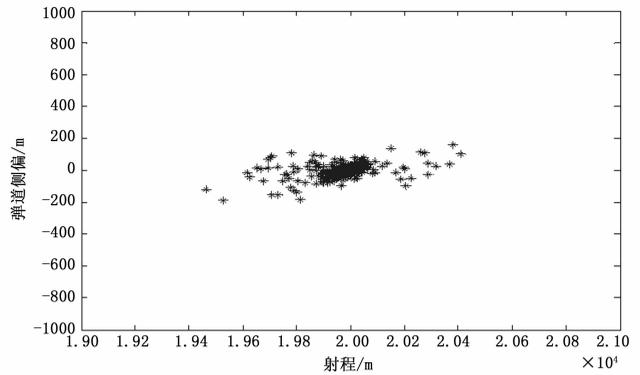


图 5 有控落点散布图

布，射击精度得到较大提高。

### 4 结论

- 1) 采用修正质点弹道模型预测制导火箭弹落点是合理可行的，为弹道修正控制工程实现提供参考。
- 2) 落点预测制导律可以用于制导火箭修正控制，CEP 由 231 m 减小为 31 m，大幅提高了制导火箭落点精度。
- 3) 研究火箭的特性，进一步设计自适应的控制器，使研究内容更有实际意义。

#### 参考文献:

[1] 王金柱, 吕 帅, 张 明, 等. 某型制导火箭弹控制系统设计与仿真 [J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32 (1): 57-59.

[2] 宋伟锋, 杨泗智, 王全忠, 等. GPS 在制导火箭弹中应用研究 [J]. 沈阳理工大学学报, 2013, 32 (5): 59-63.

[3] 张明星, 黄晓霞. 国外远程制导火箭弹技术现状与趋势 [J]. 四川兵工学报, 2013, 34 (7): 59-62.

[4] 杨永亮, 吴小役, 曹 斌, 等. 低成本制导火箭弹飞行控制系统设计与仿真 [J]. 测控技术, 2014, 33 (3): 90-93.

[5] 蒋 明, 宋卫东. 过重力补偿比例导引弹道仿真研究 [J]. 战术导弹技术, 2008 (2): 71-74.

[6] 卞伟伟, 王良明, 李 岩, 等. 制导火箭弹最优末制导律设计 [J]. 弹道学报, 2013, 25 (4): 27-31.

[7] 闫章更, 祁载康. 射表技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[8] 钱杏芳, 林瑞雄, 赵亚男. 导弹飞行力学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000.

[9] 杨 俊, 钱 宇. 基于预测落点导引律的制导炸弹中制导律设计 [J]. 计算机仿真, 2011, 28 (8): 87-89.

[10] 金 忠. 圆概率偏差的测定与检验 [J]. 南京理工大学学报, 1995, 19 (2): 135-138.

(上接第 131 页)

[2] 刘振吉, 高世鹰, 冉启友. 脉冲雷达高度表通用测试设备的设计 [J]. 信息与电子工程, 2010, 8 (3): 345-348.

[3] 刘振吉, 袁 强, 袁小兵. 串口数据丢帧引起的雷达测试故障原因分析 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (10): 3245-3246.

[4] 李合平, 王志云, 尚朝轩. 虚拟仪器在雷达接收机灵敏度测试中的应用 [J]. 国外电子测量技术, 2001 (1): 18-20.

[5] 唐昌文, 杨江平, 徐晨曦. 雷达接收机灵敏度现场测量及工程实现 [J]. 中国测试技术, 2003 (1): 32-33.

[6] 王 勇, 叶灵伟, 冯 威. 雷达接收机灵敏度自动测量的实现 [J]. 测控技术, 2007, 26 (5): 46-48.

[7] 钱玉莹, 李淑华, 叶灵伟. 雷达接收机灵敏度自动测试方案设计 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10 (26): 6544-6546.

[8] 刘振吉, 傅 焯, 底 健. 检定专用测试设备的通用计量系统设计 [J]. 中国测试技术, 2008, 34 (6): 8-11.

[9] 王伟斌, 路 辉, 郎荣玲. 基于二分法的雷达高度表灵敏度测试方法优化研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23 (4): 28-32.