

doi: 10.7690/bgzdh.2018.06.011

# 无线电引信距离波门压缩的实现与仿真

苏益德<sup>1</sup>, 路明<sup>2</sup>, 叶文<sup>2</sup>, 熊波<sup>2</sup>

(1. 海军航空大学研究生管理大队, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空大学兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 为避免防空导弹在拦截超低空飞行目标时无线电引信受海面杂波的干扰, 对距离波门压缩的电路实现方式进行研究。分析了距离波门压缩的原理, 给出了高度跟踪和波门压缩的实现方式, 并在 Matlab/Simulink 仿真平台下进行仿真验证。结果表明: 该方式能准确地实现高度跟踪和距离波门压缩, 有效抑制海杂波对无线电引信的干扰。

**关键词:** 无线电引信; 海杂波; 距离波门压缩; Simulink

**中图分类号:** TP15 **文献标志码:** A

## Realization and Simulation of Range Gate Compression on Radio Fuse

Su Yide<sup>1</sup>, Lu Ming<sup>2</sup>, Ye Wen<sup>2</sup>, Xiong Bo<sup>2</sup>

(1. Brigade of Graduate Students, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China;

2. Department of Ordnance Science &amp; Technology, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In order to avoid the problem that the radio fuse is disturbed by the sea clutter when intercepting the ultra-low altitude flight target, the realization of the range gate compression circuit is studied. This paper gives the realization of the high degree tracking and the range gate compression, based on analysis of the principle of the range gate compression. And this paper completes the simulation based on Matlab/Simulink. The simulation results show that the method can accurately achieve the high degree tracking and the range gate compression, and suppress sea clutter to the radio fuse.

**Keywords:** radio fuse; sea clutter; range gate compression; Simulink

### 0 引言

现代战争中, 使用防空导弹拦截海面低空飞行反舰武器的作战需求越来越迫切。当防空导弹攻击海面低空目标时, 引信在超低空状态下工作, 距海面高度小, 海杂波对无线电引信产生严重的干扰<sup>[1]</sup>, 需要超低空技术使引信有效起爆。

无线电引信抗海杂波的一种重要技术途径是距离波门压缩<sup>[2-5]</sup>, 引信依据海面高度信息实时调整各天线通道的截止距离, 使来自目标的信号通过引信距离选通波门, 而将海杂波信号截止在距离波门之外<sup>[6]</sup>, 从而提高了引信抗海杂波干扰的能力。笔者主要在分析距离波门压缩原理的基础上, 对高度跟踪和距离波门压缩的实现方式进行研究, 并在 Matlab/Simulink 仿真平台下进行了仿真验证。

### 1 距离波门压缩原理

防空导弹攻击超低空目标时采用俯冲攻击, 即由高处向目标和海面接近<sup>[7]</sup>。如图 1 所示, 图中:  $h_s$  为导弹据海面的高度;  $h_M$  为导弹相对目标的高度;  $h_T$  为目标据海面的高度。

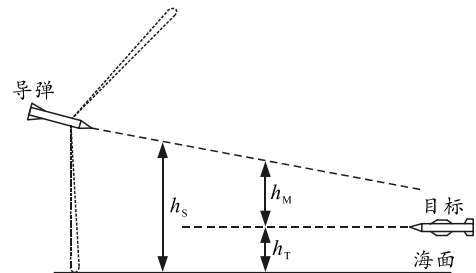


图 1 超低空弹目交会

距离波门设置如图 2 所示。其中:

$$\tau_1 = \frac{2h_M}{c}, \quad \tau_3 = \frac{2h_s}{c}, \quad \tau_3 - \tau_1 = \frac{2h_T}{c}。$$

$\tau_3$  处的海杂波在距离波门宽度  $\tau_2$  以外, 而信号脉冲全落在波门内,  $\tau_3 - \tau_2$  为过渡区。

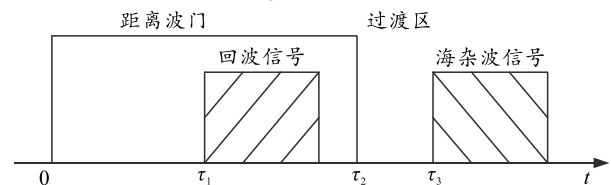


图 2 距离波门设置

当导弹接近目标时, 海面杂波很强, 远大于目标反射信号, 引信根据导弹与海面的高度调节

收稿日期: 2018-02-26; 修回日期: 2018-03-22

作者简介: 苏益德(1992—), 男, 山东人, 研究生, 从事军用目标近程探测、识别与干扰研究。

距离门宽度，始终保持与海面之间有一个安全高度(过渡区)，既保证目标信号有效进入波门，对起爆信号的形成发挥作用，又将海杂波信号截止在距离波门之外，不能进入引信的信号处理电路，从而抑制海杂波。

## 2 实现方式

### 2.1 高度跟踪

导弹在攻击超低空目标时，无线电引信距离波门根据导弹距海面高度信息进行距离波门的压缩，使引信的作用距离与海面之间始终有一定的安全高度，因此在弹目交会过程中应实时跟踪导弹距海面的高度。

无线电引信只有在超低空工作状态下才需要测高和进行高度跟踪，同时导弹距海面高度越低，距离波门宽度越小，引信的启动概率越低<sup>[8]</sup>。因此导弹高度跟踪的范围为  $h_{\min} \sim h_{\max}$ 。高度跟踪实现方式如图 3 所示。

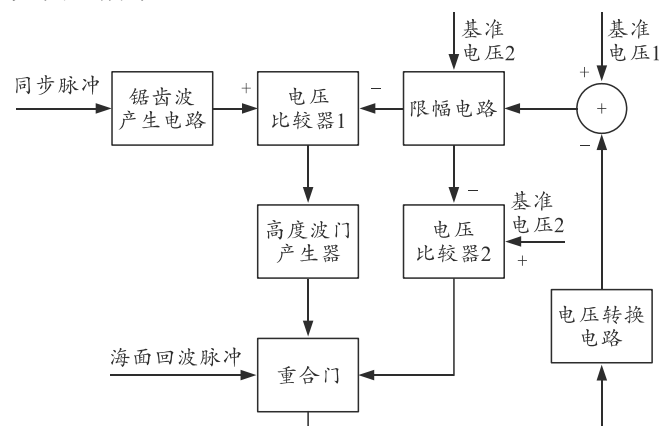


图 3 高度跟踪的原理

锯齿波产生电路根据同步脉冲信号产生倾斜上升的锯齿波，输入到电压比较器 1 正相端，与从反相端输入的限幅电路输出电压进行比较。当锯齿波电压大于限幅电路输出电压时，比较器输出为 1(高电平)，触发高度波门产生器产生高度波门，与海面回波脉冲在重合门内相关<sup>[9]</sup>。

初始时重合波门没有脉冲输出，电压转换器输出为 0，锯齿波电压与基准电压 1 比较，输出上升沿触发高度波门产生器形成等待波门，即有  $\Delta\tau_0 = 2 \frac{h_{\max}}{c}$ ， $c$  为电磁波传播速度。当导弹高度下降到接近  $h_{\max}$ ，等待波门内出现有海面回波信号，才接通高度跟踪环路，高度波门开始左移。

当重合门输出相关脉冲信号时，即海面回波进

入高度波门，相关脉冲在电压转换电路内转换成与脉宽成比例的阶梯负电压。阶梯负电压与基准电压 1 相加进入电压比较器反相端，参与下一个周期的电压比较，如此形成一个高度跟踪的环路，跟踪的高度也不断压缩。

$h_{\min}$  对应的基准电压 2 为限幅电路输出电压的最小值，当限幅电路输出电压未达到最小值时，电压比较器 2 输出为高电平，重合门正常工作；随导弹高度不断下降，高度波门不断左移，相加器输出电压也不断减小，当限幅电路输出达到最小值时，电压比较器 2 输出为 0，重合门堵塞，高度跟踪环路断开，高度波门不再左移，此时有  $\Delta\tau_3 = 2 \times \frac{h_{\min}}{c}$ 。

如图 4 中， $\Delta\tau_1$  为周期  $T_1$  时高度波门相对同步脉冲的延时， $\Delta\tau_2$  为周期  $T_2$  时高度波门相对于同步脉冲的延时，由图可知  $\Delta\tau_2 < \Delta\tau_1$ 。

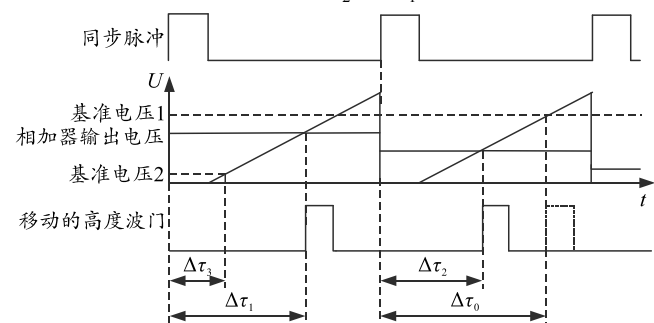


图 4 高度跟踪时序

### 2.2 距离波门压缩

距离波门压缩是距离波门产生电路与高度跟踪电路联系起来，使高度波门左移的同时，距离波门得到压缩。

距离波门的设置方式：首先确定过渡区的大小，然后依据海面高度对应的延时减去过渡区即为接收波门的宽度。这样能保证引信不会误动作，且回波信号落入距离波门就能正常启动。过渡区是在考虑波门脉冲后沿、测高精度和电路控制精度从而设定的<sup>[10]</sup>。理想情况下过渡区为 0，各种误差越小，过渡区越小，但过渡区越大，越能保证无误动作。

距离波门形成的方式如图 5 所示，锯齿波产生电路根据同步脉冲信号产生倾斜上升的锯齿波，输入到电压比较器，与相加器输出电压作比较。当锯齿波电压小于相加器输出电压时，比较器输出为 1(高电平)，反之则输出为 0(低电平)，在电压比较器输出高电平期间触发距离波门产生器产生距离波门。在高度跟踪期间，导弹距海面高度的降低，使

高度波门逐渐左移的同时使高度跟踪电压逐渐减小，从而在过渡区电压一定的条件下实现距离波门宽度的压缩。当高度跟踪环路断开时，高度跟踪电压不再变化，距离波门宽度停止压缩。

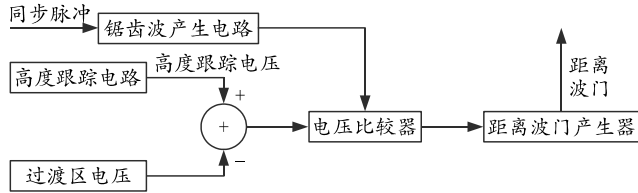


图 5 距离波门形成的原理

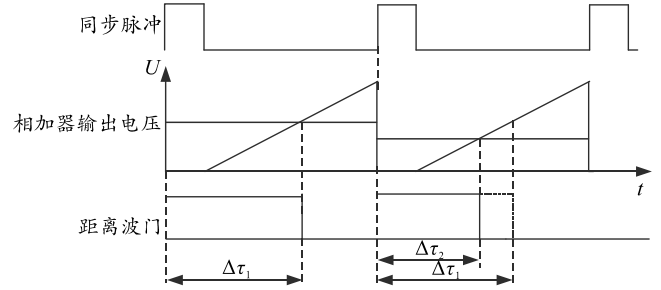


图 6 距离波门压缩时序

如图 6 所示， $\Delta\tau_1$  为周期  $T_1$  时距离波门的宽度， $\Delta\tau_2$  为周期  $T_2$  时距离波门的宽度，由图可知  $\Delta\tau_2 < \Delta\tau_1$ 。

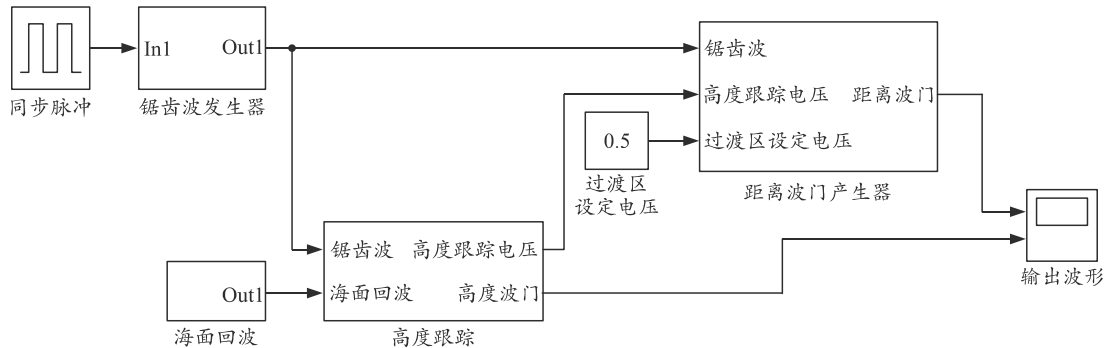


图 7 无线电引信距离波门压缩的仿真模型

### 3 仿真验证

#### 3.1 仿真模型

根据距离波门压缩的工作原理，建立无线电引信距离波门压缩的仿真模型如图 7 所示。

#### 1) 高度跟踪模块。

高度跟踪模块的内部结构框图如图 8 所示，其

中子模块电压比较器 1、高度波门产生器、电压转换电路的内部结构如图 9—11 所示。

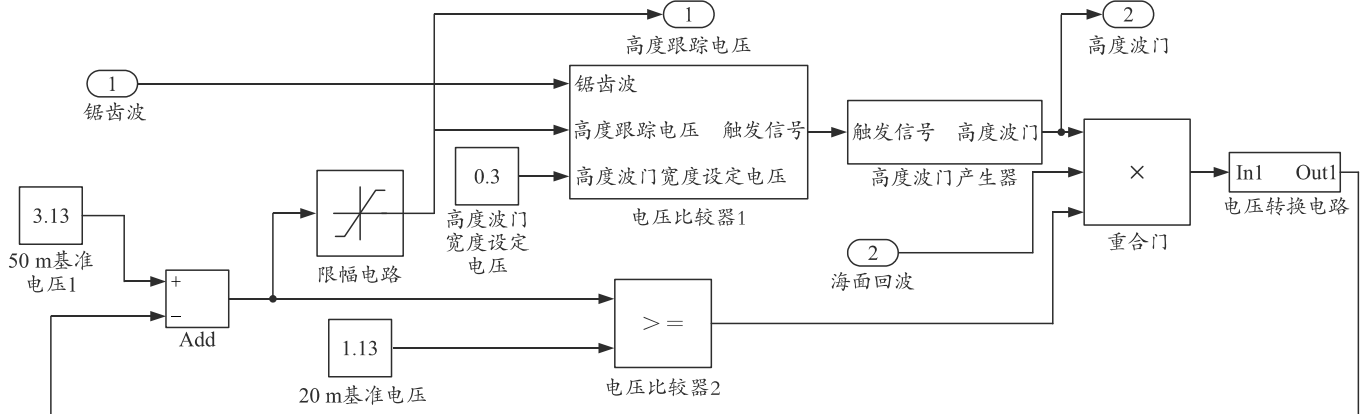


图 8 高度跟踪模块内部结构

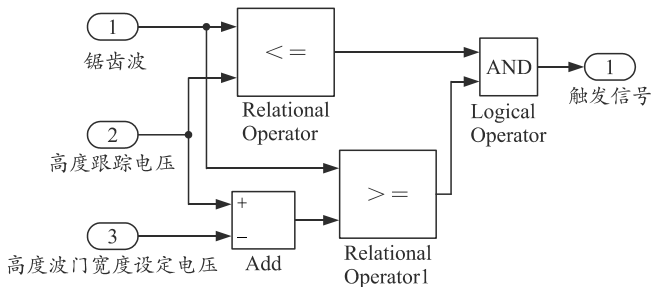


图 9 电压比较器 1 模块内部结构

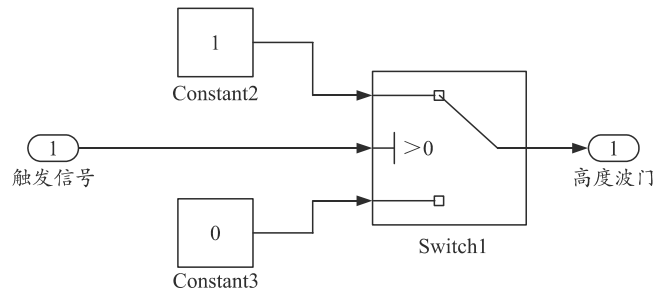


图 10 高度波门产生器模块内部结构

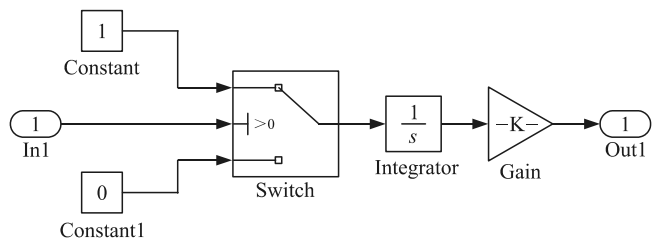


图 11 电压转换电路内部结构

电压比较器 1 模块用于实现锯齿波电压和相加器输出电压的比较；电压比较器 2 模块用于当导弹距海面高度  $h_{\min}$  时产生阻塞重合门的低电平信号；高度波门产生模块用于在触发信号为高电平期间产生高度波门；重合门用于实现海面回波和高度波门的相关运算；电压转换电路模块用于将海面回波信号与高度波门脉冲相关后的窄脉冲转换为压值随脉冲累积个数而进阶下降的电压；限幅电路模块使相加器模块输出电压  $\geq$  基准电压 2。

2) 锯齿波产生器模块。

锯齿波产生器模块的内部结构如图 12 所示，该模块的作用是把同步脉冲反向并通过积分器转换成锯齿波。

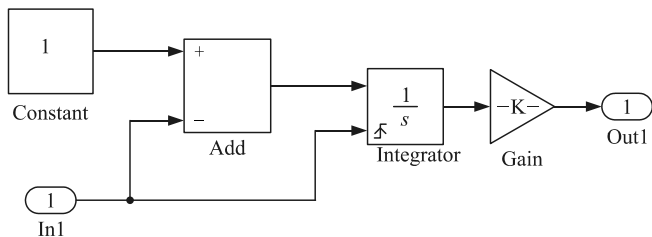


图 12 锯齿波产生器模块内部结构

3) 距离波门产生器模块。

距离波门产生器模块的内部结构如图 13 所示，该模块的作用是实现在锯齿波电压与相加器模块输出电压的比较，当锯齿波电压小于相加器模块输出电压时产生触发信号，在触发信号期间产生距离波门。

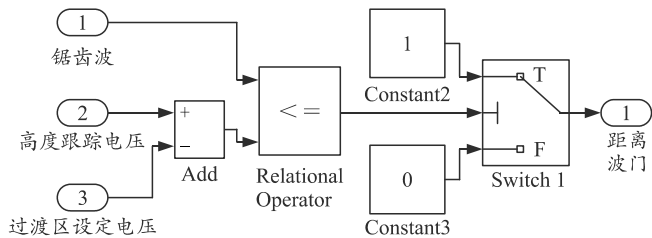


图 13 距离波门产生器模块内部结构

4) 海面回波模块。

海面回波模块的内部结构如图 14 所示，海面回波通过 S 函数编程实现，在弹目交会过程中，空空导弹据海面高度逐渐降低，接收机接收回波时间逐渐减小，海面回波波形后一周比前一周

期依次左移。

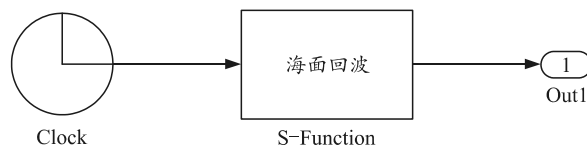
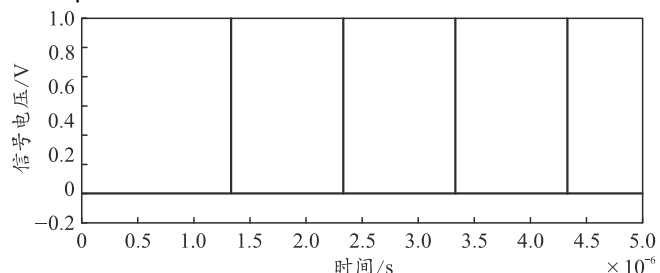


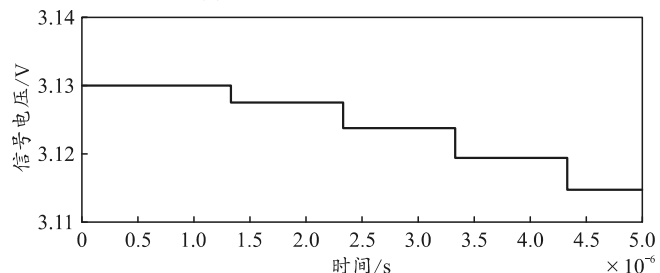
图 14 海面回波模块内部结构

3.2 仿真结果

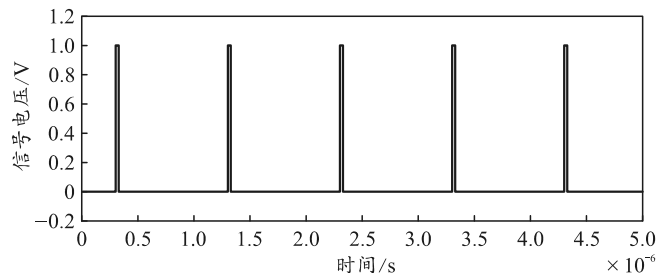
仿真参数设置：高度跟踪范围 20~50 m，导弹相对海面的速度为 1 500 m/s，同步脉冲的宽度为 20 ns，周期为 1  $\mu$ s，信号电平 1 V，高度波门的宽度为 30 ns，过渡区宽度为 30 ns，仿真时间设置为 0~4  $\mu$ s，具体仿真结果如图 15 所示。



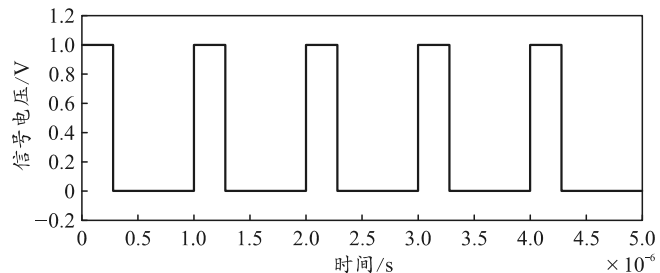
(a) 重合门输出相关脉冲



(b) 高度跟踪电压



(c) 高度波门



(d) 距离波门

图 15 仿真结果

针对各级风险，项目组和研究室从人、机、料、法和环等方面制定了控制措施，并保证各项措施得到有效落实和闭环，未发生质量隐患。该航天器按要要求于 2015 年出厂并发射，尽管压缩整星总装研制周期 25%，但在北京地区和发射场均实现了“零缺陷”的质量目标。

### 3 结束语

笔者将数据分析方法与风险管理程序相结合，提出了基于数据处理的风险评价模型，给出了风险计算公式和风险等级评价准则，采取表格的形式制定和落实人、机、料、法、环等方面的控制措施。该方法在我国航天器总装过程中进行了成功应用。实践结果证明：该模型和方法适应航天器总装过程的特点，能够实现航天器总装过程风险的有效辨识与控制，使风险识别实现量化，预警体系更加明确，风险管控水平显著提升，为大型航天器总装研制过程的风险管理提供了新的思路和方法。

### 参考文献：

- [1] 邢雪瑞. 航天产品总装质量链管理技术研究[D]. 南京：南京航空航天大学, 2012: 1-5.

\*\*\*\*\*

(上接第 47 页)

由仿真结果可得：当导弹距海面高度逐渐降低并低于 50 m 时，海面回波和高度波门在重合门内产生相关脉冲。同时随着导弹距海面高度降低，高度跟踪电压逐渐减小，且下降的幅度与相关脉冲的宽度成比例。当高度跟踪电压减小时，高度波门左移，距离波门压缩。当导弹高度由 50 m 下降到 20 m 时，高度波门相对于同步脉冲的延时由 313 ns 处左移至 113 ns 处，距离波门的宽度由 283 ns 压缩至 63 ns，故该电路系统能准确地实现高度跟踪和距离波门的压缩<sup>[1]</sup>。

### 4 结论

距离波门压缩是无线电引信抗海杂波干扰的一种重要技术手段。笔者通过分析距离波门压缩的原理，对高度跟踪和波门压缩的实现方式进行研究，并在 Matlab/Simulink 环境下构建了距离波门压缩的模型。从仿真结果看：该方法能够准确地实现高度跟踪和距离波门压缩，有效地将海杂波抑制在引信的目标检测范围之外，增强了目标检测的准确性和可靠性，从而提高了引信超低空作战能力。

- [2] 谭维炽, 胡金刚. 航天器系统工程[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009: 577-581.
- [3] 宋建聪, 戴青云, 付品欣, 等. 数据挖掘在生产过程质量管理中的应用[J]. 现代制造工程, 2013(9): 12-16.
- [4] JURAN J M, GODFREY A B. Quality Control handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 1999: 8-10.
- [5] 胡胜. 基于数据挖掘的质量过程诊断建模[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2013: 3-7.
- [6] 邬文帅. 基于多目标决策的数据挖掘方法评估与应用[D]. 西安: 电子科技大学, 2015: 5-8.
- [7] 李江, 雷晓刚. 基于 Multi-Agent 技术的大型航天研发项目风险分析方法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(6): 148-152.
- [8] 郭宝柱. 航天项目风险管理——预先识别与控制风险到可接受程度[J]. 航天器工程, 2014, 23(4): 1-4.
- [9] 龚霄, 邓超志, 朱怀金, 等. 输变电设备多源数据处理系统的功能设计[J]. 机电工程, 2017, 34(6): 659-663, 673.
- [10] 刘玉刚. 航天总装工艺专业内涵及体系地位简析[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(1): 108-113.
- [11] 彭涛, 李世其, 徐迟, 等. 面向航天器舱体的智能装配系统研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(5): 545-549.
- [12] 米洁, 邓家褪. 观测卫星概念方案设计及其不确定性研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(7): 781-786.

### 参考文献：

- [1] MARVIN K S. Speed spectrum communications handbook[M]. McGraw: Hill Companies, 2002: 22-25.
- [2] 陈小霞, 朱建平, 李玉钊. 基于距离波门压缩的无线电引信抗海杂波干扰技术[J]. 制导与引信, 2014, 35(1): 21-24.
- [3] 曹亮, 尹逊青, 秦丽. 脉冲多普勒引信抗干扰通道距离门优化设计[J]. 航空比兵器, 2017(1): 79-82.
- [4] 闫岩, 李玉钊, 刘岩. 超低空引信截止距离压缩因子计算方法[J]. 制导与引信, 2016, 37(3): 19-22.
- [5] 路明, 林涛, 赵曦. 无线电引信抗海杂波干扰技术分析[J]. 探测与控制学报, 2007, 29(2): 35-41.
- [6] 赵惠昌. 无线电引信设计原理与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 73-75.
- [7] 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: 148-150.
- [8] 周新刚, 赵惠昌, 涂友超. 脉冲多普勒引信抗干扰性能评判方法和仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(1): 207-211.
- [9] 褚凯, 朱一旺, 牛红岩. 便携式无线电频谱管理系统研究与实现[J]. 兵工自动化, 2016, 35(9): 38-40.
- [10] 刘跃龙, 张艳. 超低空引信技术综述[J]. 制导与引信, 2010, 31(4): 1-6.
- [11] 苏益德, 路明, 臧伟. 无线电引信海面后向散射系数仿真分析[J]. 兵器装备工程学报, 2017(5): 52-55.