

Research on Radar Receiver Anti-Jamming Circuit Design

Shuhua Li

Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao Shandong
Email: xiaoxiao_0731@163.com

Received: Jul. 29th, 2017; accepted: Aug. 11th, 2017; published: Aug. 16th, 2017

Abstract

Taking airborne radar receiver for an example, this dissertation elaborates some key technologies of anti-jamming, the automatic testing of AGC, IAGC and multi-filtering under one million jamming pulse every second through the computer simulation system. The system tests the width of the jamming pulse which is 100% bigger, 60% bigger and 100% smaller than the radar signal respectively, and demonstrates the SNR curve. Three groups of quantitative analysis data are given; then the quantitative analysis of the receiver filter bandwidth of noise energy before and after filtering when changes in 0.6 ~ 0.8 is presented. The study in this dissertation will not only provide the universal technique for the development of radar receiver, but also provide a valuable reference to the engineering application of other electronic equipment in our nation.

Keywords

Radar Receiver, Anti-Jamming, Complex Electro-Magnetic Environment

机载雷达接收机抗干扰电路设计研究

李淑华

海军航空工程学院青岛校区, 山东 青岛
Email: xiaoxiao_0731@163.com

收稿日期: 2017年7月29日; 录用日期: 2017年8月11日; 发布日期: 2017年8月16日

摘 要

以接收机为主要对象, 总结了接收机典型的抗干扰方法, 并通过实验仿真先是针对宽限窄、邻近噪声自动增益控制、IAGC、多级滤波等抗干扰措施在每秒100万个脉冲的干扰信号情况下, 分别测试了干扰信

号的脉宽分别为100%大于/60%大于/100%小于雷达信号的脉冲宽度的情况下加入抗干扰电路前后的信干比变化情况,给出了三组量化分析数据;其后量化分析了接收机滤波器时宽带宽积在0.6~0.8之间变化时滤波前后的噪声能量比,从而为接收机滤波器带宽的选择提供了一些量化依据。

关键词

雷达接收机, 抗干扰, 复杂电磁环境

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自雷达被用于军事领域,发挥出越来越重要的作用。与此同时,雷达对抗战也随着电子技术的发展越演越烈。雷达干扰和抗干扰是一对立的存在。一种新雷达技术的应用会引起一种新的干扰技术;而新的干扰又必然促发新的雷达抗干扰措施。这样循环促使雷达干扰和抗干扰技术不断发展[1] [2]。

本文以接收机为主要对象,总结了接收机典型的抗干扰方法,并通过实验仿真先是针对宽限窄、邻近噪声自动增益控制、IAGC、多级滤波等抗干扰措施在每秒100万个脉冲的干扰信号情况下,分别测试了干扰信号的脉宽分别为100%大于/60%大于/100%小于雷达信号的脉冲宽度的情况下加入抗干扰电路前后的信干比变化情况,给出了三组量化分析数据;其后量化分析了接收机滤波器时宽带宽积在0.6~0.8之间变化时滤波前后的噪声能量比,从而为接收机滤波器带宽的选择提供了一些量化依据。

2. 雷达接收机抗干扰电路概述

现代复杂电磁环境对雷达接收机的性能提出了更高的要求,使得接收机为抗干扰而设计的辅助电路大大增加,这部分的大多数技术都围绕增益控制展开[3] [4] [5]。

◆ 宽-限-窄电路

目前一种主要用来抗扫频干扰、以防接收机饱和的专门电路。

◆ 邻近噪声自动增益控制

目标是减小噪声干扰、地物杂波以及无源箔条在雷达接收机里的有害影响。用在脉冲跟踪雷达上的脉间、开环、快速自动增益控制,用紧跟在信号脉冲前后的噪声信号来控制中放增益。

◆ 覆盖脉冲通道

检测到以下两种信号后把开关置于另一个位置,利用覆盖脉冲通道收到的干扰功率密度的相对值、我雷达参数、雷达位置、大气、地面条件等信息对干扰信号进行分析并调整发射信号:(a) 低于跟踪门限的正常通道信号电平;(b) 强覆盖脉冲信号。

◆ 双门限

用两个门限电平在噪声或干扰环境中检测目标。

◆ 序贯检测

当雷达受到严重噪声干扰时,采用三个或更多个门限电平检测信号。

◆ 反置检测

瞬时自动增益控制(IAGC)的一种类型,其响应时间近似等于雷达脉宽。

◆ 恒虚警率宽带 - 限幅 - 窄带电路

由宽带中频放大器、限幅器、窄带中频放大器和检波器组成。用于抗噪声干扰和无意干扰，减少雷达接收机饱和的影响。

◆ 快速自动增益控制

用于扫频干扰机以及噪声干扰机能在雷达的平面位置显示器的选定方位上产生干扰。

◆ 快时间常数

主要用在对数接收机中的抗地物杂波干扰及反人为干扰，降低视频电路的低频响应。

◆ 保护带恒虚警率电路

反噪声干扰或其它干扰的雷达反干扰技术。它可降低雷达接收机饱和效应，并对类似于目标的噪声信号(虚警)保持一恒定的噪声电平。

◆ 保护通道检测

在恰好高于或恰好低于雷达载频的频带中检测噪声干扰信号，以便进行对消或者启用其他反干扰办法。

◆ 积累

这是一种脉冲雷达接收机用于反干扰和改善检测能力的技术，可以对付噪声和其它有关的干扰信号或友邻干扰。积累意味着很多经过适当迟延的目标脉冲可以彼此叠加，产生比分别处理的单个脉冲大得多的输出，从而得到更高的信噪比或是信干比。

◆ 抗异步脉冲干扰电路

抗异步干扰利用异步脉冲干扰的干扰脉冲重复周期与雷达发射重复周期不同实现抗干扰。实现方法可以用模拟式，也可用数字式。抗异步脉冲干扰电路用跨周期重合电路，使目标回波信号积累。再通过门限选通电路，将异步脉冲干扰抑制，提取出目标回波。

3. 实验系统设计与结果分析

3.1. 系统总体设计

鉴于不同体制、不同用途的雷达其内部处理机制差别很大，课题研究重点从理论和实验两个方面对相控阵体制雷达进行研究，分析并仿真验证各种方法的抗干扰效果。实验系统以信号为核心展开，建立在 MATLAB7.0 平台之上，主要组成模块的框图结构如下。

图 1 中，干扰信号产生模块主要产生各种干扰信号，输入信号模拟模块负责加入复杂电磁环境下可能夹杂的各种干扰信号；接收机、信号处理模拟模块分为小的功能模块模拟接收机、信号处理的处理功能，中间可以嵌入抗干扰代码，以进行对比实验；仿真主控与雷达调度模块负责整个系统的集成和控制；输出统计模块负责输出结果的统计及图形化的显示。

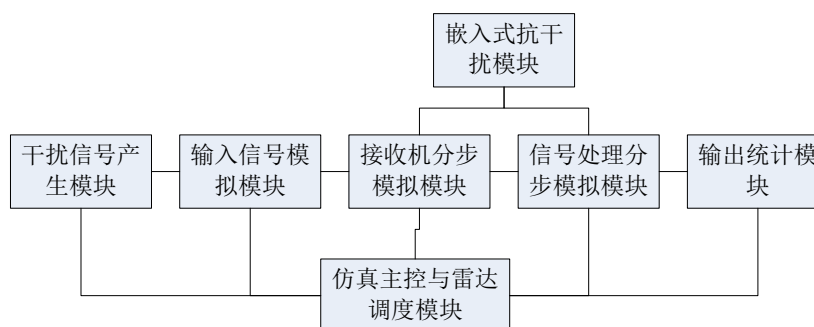


Figure 1. The flowchart of the simulation system

图 1. 仿真系统框图

3.2. 雷达信号处理原理与建模

脉冲多普勒处理主要指的是对高重频信号的相关处理，包括匹配滤波、多普勒滤波、二维 CFAR 检测等[6]。

雷达发射信号可描述为

$$S_t(t) = \sqrt{\frac{P_t L_t}{4\pi}} g_{vt}(\theta) \exp(j\omega_c t) v(t) \quad (1)$$

其中 ω_c 为载频， P_t 为发射机峰值功率， L_t 为发射综合损耗， $g_{vt}(\theta)$ 为发射天线方向图； $v(t)$ 为复调制函数，它是 N_p 个宽度为 T_r 的矩形脉冲构成的相参脉冲串。

考虑到现代雷达大多采用数字信号处理，因此，下面介绍匹配滤波的频域处理方法，其基本原理是：对输入信号作 FFT，再乘以匹配滤波器的数字频率响应函数，再经 IFFT 输出压缩后的信号序列。同样的，这里匹配滤波器的频率响应函数是输入信号在一个雷达周期内的傅立叶变换的复共轭，而不是对整个输入信号匹配。具体步骤为：

1) 针对发射信号设计匹配函数

针对发射信号的匹配接收信号表示为：

$$h_1(n) = K_r \exp\left\{j\pi b \left(n \frac{1}{F_s}\right)^2\right\} \quad (2)$$

其中， b 为线性调频斜率， F_s 为采样率，信号点数为 $M = F_s \cdot T_p$ (T_p 为脉宽)， K_r 为匹配滤波函数系数。

2) 加窗处理

$$h_2(n) = h_1(n) * w(n), \quad n = 0, 1, \dots, M \quad (3)$$

其中， $w(n)$ 为窗函数。

3) 补零 FFT 处理

$$h(n) = \begin{cases} h_2(n), & n = 0, 1, \dots, M-1 \\ 0, & n = M, \dots, N-1 \end{cases} \quad (4)$$

其中， N 为序列点数长度。

4) 对雷达目标回波信号作傅立叶变换

$$X(K) = FFT[x(n)], \quad x(n), \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

5) 匹配滤波输出：

$$y(n) = IFFT[X(K)H(K)] \quad (6)$$

目标回波信号 $S_{RF}^k(t)$ 的表达式为

$$\begin{aligned} S_{RF}^k &= \sqrt{\frac{P_t L_s}{(4\pi)^3}} \frac{g_{vt}(\theta) g_{vr}(\theta)}{R^2(t)} \lambda \sqrt{\sigma} K_{RF} F \\ &\cdot \exp\left[j\omega_c \left(t - \frac{2R_0}{C} - kT_r\right)\right] \cdot \exp\left[j\omega_d \left(t - \frac{2R_0}{C} - kT_r\right)\right] \\ &\cdot \text{Rect}\left[\frac{t - \frac{2R(t)}{C} - kT_r}{T_p}\right] \end{aligned} \quad (7)$$

其中 P_t 为雷达发射机峰值功率； L_s 为雷达发射接收综合损耗，包括发射损耗 L_t ，接收损耗 L_r ，大气损耗 L_{dq} ，脉压损耗 L_{pc} 以及双程波束损耗 L_{BS} 等； $g_v(\theta)$ 和 $g_r(\theta)$ 分别为发射、接收天线方向图； σ 为目标 RCS，由目标特性决定； λ 为工作波长； K_{RF} 为射频滤波放大系数； F 表示遮挡对回波信号幅度的影响； C 为光速，即 3×10^8 m/s； ω_c 为载频； T_r 脉冲重复周期； T_p 为脉冲宽度； ω_d 为多普勒频率， $\omega_d = \omega_c 2\dot{R}/C$ ； R_0 为第 k 个脉冲与目标相遇时，目标相对于雷达的距离[7]。

射频信号经过混频、变频后成为零中频信号，即视频信号。根据射频回波信号模型建立数字视频信号模型。对于 HPRF 脉冲多普勒雷达导引头，在给定的 CPI 内每个脉冲重复周期对回波采样一次，即目标回波的采样为

$$s(k) = A_k \exp\{j\varphi_k\}, \quad k = 0, 1, \dots, N_p - 1 \quad (8)$$

其中 A_k 为 CPI 中第 k 个脉冲回波的幅度， φ_k 为对应于 CPI 第 k 个脉冲回波的多普勒相位。在给定的 CPI 内，目标回波的多普勒相位每个脉冲重复周期更新一次，且：

$$\varphi_k = \frac{4\pi}{\lambda} \left[v_{LOS}(k-1)T_r + \frac{1}{2} a_{LOS} [(k-1)T_r]^2 \right], \quad k = 0, 1, \dots, N_p - 1 \quad (9)$$

其中 φ_k 为对应于 CPI 第 k 个脉冲回波的多普勒相位， λ 为雷达发射信号波长， T_r 为脉冲重复周期， v_{LOS} 、 a_{LOS} 分别为当前 CPI 开始目标相对于导引头的径向速度和该 CPI 期间平均径向加速度[8] [9]。

目标回波的信号幅度在每个脉冲周期更新一次，根据雷达方程可得：

$$A_k = \sqrt{\frac{P_t L_s}{(4\pi)^3}} \frac{g_t(\theta) g_r(\theta)}{R_k^2} \lambda \sqrt{\sigma_k} K_{RF} F, \quad k = 0, 1, \dots, N_p - 1 \quad (10)$$

其中 P_t 为发射信号功率， L_s 为雷达发射接收综合损耗， $g_t(\theta)$ 为发射天线方向图， $g_r(\theta)$ 为接收天线方向图， R_k 为该脉冲期间的导弹 - 目标距离， λ 为雷达发射信号波长， σ_k 为该脉冲期间目标的雷达截面积， K_{RF} 为射频放大系数， F 表示遮挡对回波信号幅度的影响。

3.3. 接收机抗干扰电路实验

接收机部分的抗干扰措施主要围绕电路时常数控制、增益控制、门限调整、辅助通道配合和信号积累等展开，而增益控制往往与电路时常数控制结合使用[6]。

参考文献[6]的分析，在雷达抗干扰电路方面，本文以接收机为主要对象，先是针对宽限窄、邻近噪声自动增益控制、IAGC、多级滤波等抗干扰措施在每秒 100 万个脉冲的干扰信号情况下，分别测试了干扰信号的脉宽分别为 100% 大于/60% 大于/100% 小于雷达信号的脉冲宽度的情况下加入抗干扰电路前后的信干比变化情况，给出了三组量化分析数据；其后量化分析了接收机滤波器时宽带宽积在 0.6~0.8 之间变化时滤波前后的噪声能量比，从而为接收机滤波器带宽的选择提供了一些量化依据。

实验中，首先调用干扰信号产生模块产生每秒 100 万个脉冲的干扰信号，干扰信号的脉宽分别为 100% 大于/60% 大于/100% 小于雷达信号的脉冲宽度，信号基准频率为 100 MHz，发射脉冲宽度为 1 μ s，采样率为 3 倍于信号频率。

干扰信号的截图如下图 2~4 所示，其中每帧时长 0.001 ms，共 0.1 ms。

通过计算加入宽限窄、邻近噪声自动增益控制、IAGC、多级滤波等抗干扰电路前后的信干比(其中目标回波信号在 100 公里以外)，得到信干比曲线如图 5 所示，其中红色曲线为未加入抗干扰电路的信干比变化曲线，而绿色的曲线为加入抗干扰电路后的信干比变化曲线，可以看出：

- 1) 初始无干扰时，信干比为 0.5~2；
- 2) 干扰变弱时，改善效果较好；

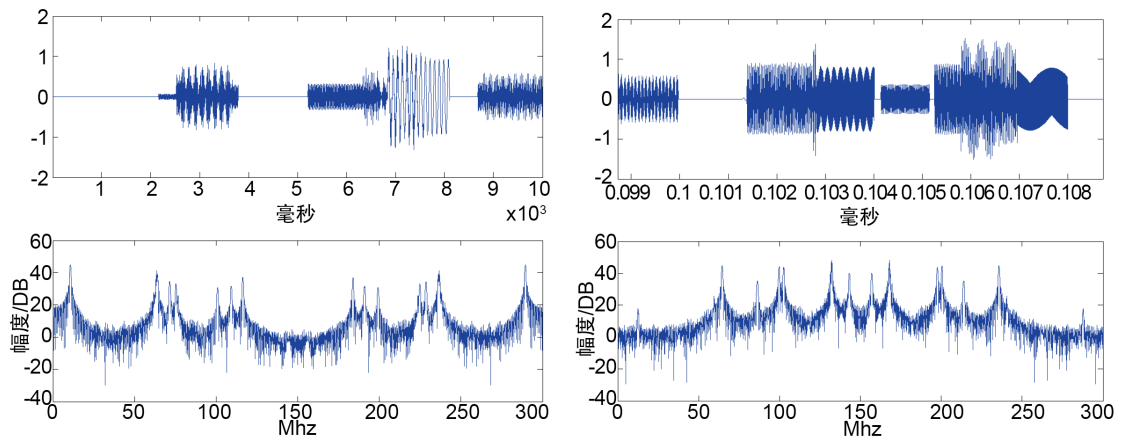


Figure 2. The interference signal of signal to interference ratio changes with 100% greater than the pulse width of the radar signal

图 2. 干扰信号的脉宽 100%大于雷达信号脉宽的干扰信号

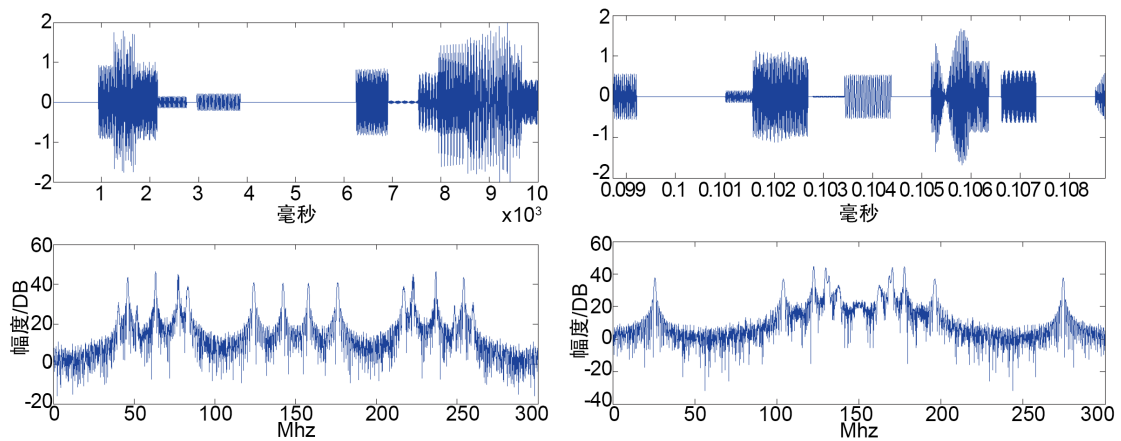


Figure 3. The interference signal of signal to interference ratio changes with 60% greater than the pulse width of the radar signal

图 3. 干扰信号的脉宽 60%大于雷达信号脉宽的干扰信号

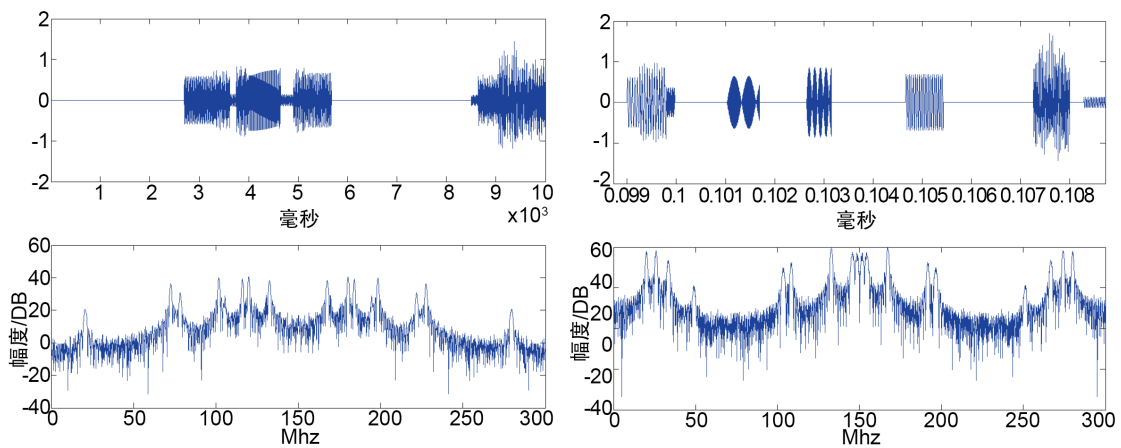


Figure 4. The interference signal of signal to interference ratio changes with 100% less than the pulse width of the radar signal

图 4. 干扰信号的脉宽 100%小于雷达信号脉宽的干扰信号

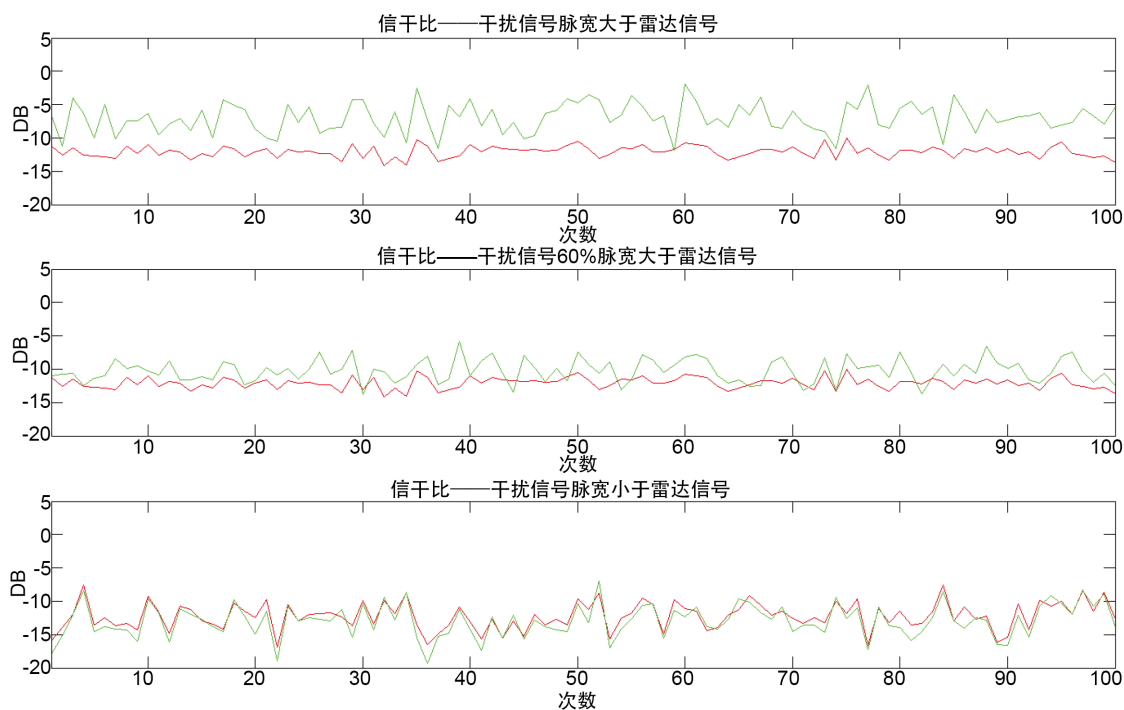


Figure 5. The SNR curve of the addition of anti-jamming circuits

图 5. 加入抗干扰电路前后的信干比变化曲线

3) 干扰脉宽均大于信号脉宽的, 改善 5~7 dB, 总体效果最好; 干扰脉宽 60% 大于信号脉宽的, 改善 2~4 dB, 效果居中; 干扰脉宽小于信号脉宽的, 改善 0~1 dB, 效果较差, 实验说明接收机部分的抗干扰电路大多是针对宽脉冲干扰而设计的。

鉴于接收机滤波器设计的理论最佳值(针对高斯型和方波型的脉冲信号)为 $B\tau = 0.72$, 我们在试验中使得 $B\tau$ 在 0.6~0.8 之间变化, 并使滤波器加宽值在 0.1~0.5 MHz 变化, 其他参数同上, 得出接收机内进入噪声的变化情况。滤波器频率响应如图 6 所示。

4. 结束语

目前, 尽管雷达接收机的技术已经比较成熟, 而且已经研制了许多抗干扰电路, 但在复杂电磁环境下, 由于激烈对抗条件下产生了多类型、全频谱、高密度的电磁辐射信号, 不可避免地会在电子设备间引起相互影响和强烈干扰, 接收机作为“迎战”这些信号的“前线部队”仍然需要在抗干扰方面做大量的研究工作。

首先, 未来战场的信号环境密度预计最高可达 150 万脉冲/秒, 相当于 1800 个电磁辐射源同时辐射的总和[1], 雷达接收机在这种高强度高密度的电磁环境中的生存问题首当其冲。经天线反干扰后, 残存的干扰如果足够大, 则将引起接收处理系统的饱和, 接收机饱和轻则导致目标信息的丢失, 重则烧坏接收机。因此需要根据雷达的用途研制相应的增益控制和抗饱和电路, 目前已经采用的宽-限-窄电路等技术主要用来抗扫频干扰、宽脉冲干扰等。针对其他类型的干扰以及复杂电磁环境下应对高强度高密度信号的接收问题仍然没有很好地解决。

第二, 接收机部分各种抗干扰电路的组合问题值得深入研究, 我们的仿真实验结果表明: 在加入每秒 100 万个脉冲干扰的情况下, 加入宽-限-窄电路、邻近噪声自动增益控制、快时间常数和双门限等抗干扰电路之后, 可以把对雷达反射截面积为 5 m^2 目标的检测概率提高 20%。然而, 实际设备的使用经

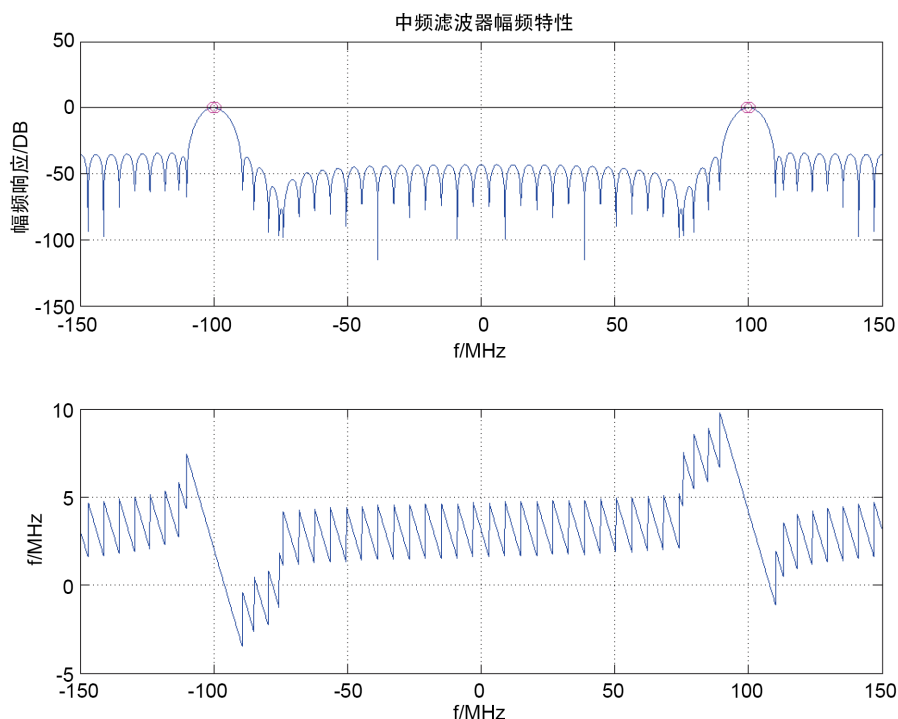


Figure 6. Filter frequency response
图 6. 滤波器频率响应

验表明：复杂的电路结构和繁琐的功能组合容易导致设备的故障率提高，致使设备可靠性下降，而简单的功能电路又会缩小设备的适用范围。因而如何针对复杂电磁环境中的信号接收问题设置合理的抗干扰电路组合也需要做大量的实验。

第三，在有些情况中，现有的一些瞬时自动增益控制会使信号脉冲失真，因为它会使中频放大器偏置回到截止状态，以至仅在信号脉冲峰值时中频放大器才处于线性区。类似这样的问题在许多抗干扰措施中都存在，也就是说，某些抗干扰电路可能优化了干扰环境下的信号检测，但在某些情况下可能起到反作用，因而在研制抗干扰电路的同时还需要考虑如何提高抗干扰电路的鲁棒性。

第四，电磁脉冲炸弹等新式武器已经对雷达接收机的生存提出了新的挑战，如何采取有效的技术和战术防止这些新式电磁武器的攻击成为一个比较重要的问题，这对接收机保护电路的设计提出了更高的要求。

第五，现有的双门限检测和序贯检测为门限设置方法的研究提供了一些启示，在复杂电磁环境下，如何针对目标信号和干扰的差别对传统的门限计算方法进行改进以提高检测概率，也期待有新的思路和方法出现。

参考文献 (References)

- [1] 韩晓东, 孙清洋, 舒汀, 唐斌, 郁文贤. 机载有源相控阵雷达抗干扰试验评估研究[J]. 现代雷达, 2017, 39(2): 91-96.
- [2] 弋稳. 雷达接收机技术[M]. 北京: 电子出版社, 2006.
- [3] 康成刚. 陆基雷达接收机采用 PD 体制的设计需求研究[J]. 现代雷达, 2017, 39(2): 83-86.
- [4] 林瑞平. 常规雷达接收机技术的发展[C]. 雷达网年会暨军民两用雷达技术在国民经济建设中的应用研讨会, 2011.

-
- [5] 宋晓雪. 基于船用导航雷达接收机滤波电路设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2016.
- [6] 张江涛, 孙海辉, 段仁军. 雷达接收机抗干扰技术研究述评[J]. 四川文理学院学报, 2015, 25(5): 36-40.
- [7] Maksimov, M.V., Bobnev, M.P., Shustov, L.N., *et al.* (1979) RADAR Anti-Jamming Techniques. Dedham, Mass., Artech House, Inc., 435 p.
- [8] 李晔, 王强. 雷达抗干扰技术的实现方法[J]. 电讯工程, 2015(1): 8-11.
- [9] 熊梓成. 雷达抗干扰技术的分析与实现[J]. 西安电子科技大学学报, 2015(3): 9-17.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: mos@hanspub.org