

文章编号: 1001 - 893X(2012)06 - 0864 - 05

弹载雷达侦察干扰设备设计*

侯利军

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要:论述了弹载雷达侦察干扰设备的天线设计、接收机设计和信号处理硬件设计,并从实际需求出发,重点讨论了信号处理算法中的信号检测技术、瞬时测频技术、雷达信号脉内调制识别技术和干扰信号产生技术。仿真结果表明所采用的信号处理算法可行,对于弹载平台雷达侦察干扰设备的设计具有指导意义。

关键词:弹载平台;雷达信号侦察;能量检测;瞬时测频;零中频接收机

中图分类号: TN974 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.06.006

Implementation of Missile-borne Radar Signal Reconnaissance and Jamming Device

HOU Li-jun

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: The design of antenna and receiver of missile - borne radar signal reconnaissance and jamming device is given, the implementation of signal processing hardware is proposed. In the algorithms of reconnaissance and jamming, signal detection, IFM (Instantaneous Frequency Measurement), modulation type recognition and jamming signal generation are emphatically discussed. Simulation results prove the feasibility of those adapted methods. The work in this paper provides reference for design of missile - borne signal reconnaissance and jamming devices.

Key words: missile - borne platform; radar signal reconnaissance; energy detection; IFM; direct-conversion receiver

1 引言

现代高技术条件下的战争中,争取控制电磁权是取得胜利的前提之一,作为电子战技术中的一个分支,弹载电子攻防技术与火力打击武器系统紧密结合,围绕探测与反探测、识别与反识别、拦截与反拦截等方面展开。比如,导弹防御系统中的 4 个要素“及时发现、正确识别、精确跟踪和有效拦截”,通过电子干扰手段破坏其要素环节,提高导弹的突防生存能力,使导弹武器作战效能得到最大程度的发挥^[1]。弹载雷达侦察干扰设备装载在导弹上,伴随弹头飞行,能够对敌雷达实施近距离侦察、干扰,在要求功率较小的情况下,起到良好的干扰效果。

弹载雷达侦察干扰设备可用于导弹突防、对敌防空电子压制、舰船自卫电子防护等,装载多种平台,如导弹、巡航弹、抛射式子弹、拖曳式子弹等。目前,国内外正在大力发展弹载雷达侦察干扰设备,如美国的 Gen - X,通过海军战斗机发射,离危险区一定距离之外,开机搜索雷达信号,并发射干扰信号干扰各种雷达制导导弹;英国的“海妖”,采用伞挂形式,在空中悬停过程中,发射复杂的干扰波形,对敌方末制导雷达实施干扰。

2 天线设计

弹载雷达侦察干扰设备的天线设计方法可以参考和借鉴其他弹载电子设备天线的设计思路。与弹

* 收稿日期: 2012 - 02 - 28; 修回日期: 2012 - 05 - 15

载雷达设备等弹载电子设备面临的问题一样,弹载雷达侦察干扰设备天线需要解决以下几个问题。

(1)有限的空间。由于弹载平台的空间比较狭小,要求天线在满足性能指标要求的前提下,物理尺寸尽量小,以满足装弹要求。

(2)严酷的工作条件。弹载电子设备的工作环境比较恶劣,需要适应振动、冲击、大过载、低气压及湿热等环境条件。

常见的弹载电子设备天线形式有:喇叭馈电反射面天线、喇叭透镜锥扫天线、卡塞格伦天线、波导隙缝阵、切角波导天线、阵子天线、介质天线、环天线和微带天线等^[2]。对于弹载侦察干扰设备,要求天线是宽波束、宽频带、中低增益的,天线形式可以考虑共型贴片阵列天线、隙缝阵列天线、喇叭天线或者螺旋天线,天线是固定的,无需伺服系统,减少整机复杂性,以适应弹径小、稳定性较差的弹载平台^[3]。

3 接收机设计

弹载雷达侦察干扰设备针对的目标信号是各种体制的雷达信号,如防空警戒雷达、火控雷达、导弹末制导雷达等。随着雷达设计技术发展,现代雷达系统一般采取了多种抗干扰和抗截获的技术,如线性调频波形、调相波形、频率捷变、超宽带波形等技术手段。这些技术手段的使用,造成雷达系统发射的信号一般是宽带信号,雷达的工作带宽可以达到 1 GHz 乃至 2 ~ 3 GHz,瞬时带宽一般在几十兆赫到上百兆赫。因此,弹载雷达侦察干扰设备的工作带宽和处理带宽必须尽量宽,才能满足实际的侦察干扰需求。

弹载雷达侦察干扰设备接收机的技术体制必须审慎选择,采用传统的超外差接收机体制无法满足弹载雷达侦察干扰设备的要求。一方面是,超外差接收机的实现结构比较复杂,需要两级变频,体积和功耗都相对较大;另一方面,超外差接收机的成本较高,由于弹载雷达侦察干扰设备一般是一次性使用,对成本比较敏感,不是非常合适。

针对雷达信号侦收的特点,相对于通信信号侦收,对信号信噪比等指标要求较低,弹载雷达侦察干扰设备接收机可以采用零中频接收机体制^[4]。低噪声放大器输出的射频信号直接进入混频器,一次变频变换到基带,经低通滤波器以及可变增益放大器后送入 ADC 采样。

4 信号处理硬件设计

弹载雷达侦察干扰设备中的信号处理硬件设计非常关键,关系到弹载雷达侦察干扰设备可采用的信号处理算法及算法实现,进而对设备整体性能具有较大影响。鉴于目前数字处理器件的水平和发展趋势,结合设备需求,弹载雷达侦察干扰设备信号处理部分的硬件设计采用 FPGA + DSP + MCU 的设计架构,模数变换器采用高速、高精度的 ADC,数模变换采用高速、高精度的 DAC。信号处理硬件的原理框图如图 1 所示。

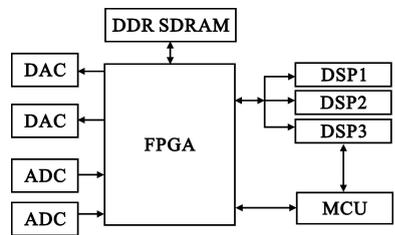


图 1 信号处理硬件框图

Fig. 1 Block diagram of signal processing hardware

弹载电子设备的设计原则不同于机载电子设备和地面电子设备。由于弹载条件下的设计约束更多、更苛刻(如体积、功耗、成本、可靠性及性能等方面),所以更强调设计方案的整体最优,而非局部最优或者性能最强,尽量采用比较成熟且经过实践验证过的技术方案,增加设计复用程度,降低设计风险,降低系统整体成本。具体到弹载雷达侦察干扰设备,在大规模集成电路芯片的选择上,主要从芯片供应、设计支持(如开发环境)和以往应用情况等几个方面考虑。

5 信号处理算法

弹载雷达侦察干扰设备的主要功能是完成雷达信号发现、分析及产生针对性的干扰信号,因此,在弹载雷达侦察干扰设备的信号处理部分中,所采用的信号处理算法主要包括信号检测技术、数字瞬时测频技术、脉内调制识别技术和干扰信号生成技术。

受限于弹载平台的使用环境及条件,比如体积较小、功耗需要严格控制等,弹载雷达侦察干扰设备可以采用的信号处理算法在保证满足相关检测与分析要求的前提下,算法复杂度一般要尽量小,或者说必须尽量优化算法实现,以降低复杂度。下面着重从信号检测、数字瞬时测频、脉内调制识别和干扰信号生成几个方面进行讨论。

5.1 信号检测技术

能否检测到信号存在是实现信号参数测量与处理的先决条件,也是最基本的要求。雷达信号的检测方法一般采用非相关检测,无需任何先验信息,如载频频率、调制方式等。弹载雷达侦察干扰设备受限于弹载环境的特殊性,对体积、功耗、可靠性等方面的要求比较高;另一方面,弹载雷达侦察干扰设备的使用环境一般是抵近侦察和抵近干扰,接收到的信号信噪比相对较高。因此,采用计算量巨大、算法复杂的信号检测算法不是非常合适,传统的能量检测算法比较适用。能量检测的原理框图如图2所示^[5-6]。

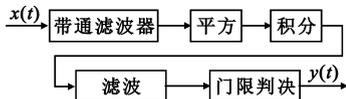


图2 能量检测器原理框图

Fig.2 Block diagram of energy detection

设定仿真条件如下:采样速率1 GHz,信号频率121 MHz,脉冲宽度2 μs,信噪比分别为0 dB和-5 dB时,加噪脉冲1的信噪比为0 dB,加噪脉冲2的信噪比为-5 dB,仿真结果如图3所示。

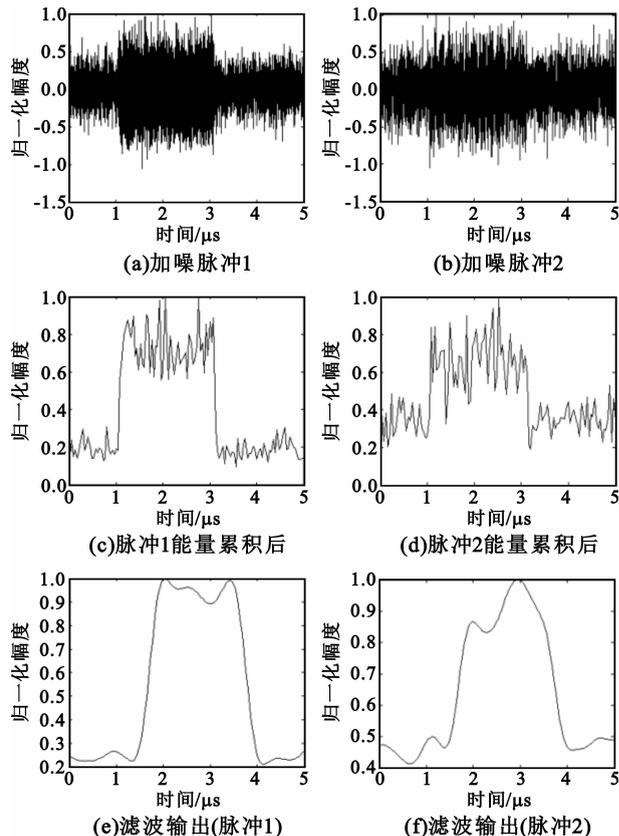


图3 能量检测仿真结果

Fig.3 The simulation results of energy detection

图3中,(a)、(c)、(e)为加噪脉冲1(0 dB 信噪比)的仿真结果,(b)、(d)、(f)加噪脉冲2(-5 dB 信噪比)的仿真结果。从图3的仿真结果可以看出,在比较低的信噪比下,能量检测算法可以很好地检测出雷达脉冲的存在,并可以对脉冲宽度进行粗估计。

5.2 瞬时测频技术

在传统的电子侦察系统中,一般采用瞬时测频接收机完成瞬时测频的任务。常用的瞬时测频接收机采用单比特瞬时测频接收机体制。单比特瞬时测频接收机具有结构简单、运算量少、覆盖带宽大等优点,但是带来了动态范围小、无多信号检测能力、较低的检测灵敏度等缺点。随着高速 ADC 器件的发展和数字处理芯片处理能力的提高,可以把宽带瞬时测频集成到信号处理模块中,利用高速 ADC,采用高精度数字测频算法,实现宽带瞬时测频。

数字瞬时测频有多种实现方法,综合考虑测频精度和实现复杂度,数字鉴相测频是一种比较合适的选择^[7]。其测频原理如下:

考虑两个以 T 为时间间隔被采样的信号序列:

$$\begin{cases} U_i = A \sin(\omega T i + \alpha) \\ V_i = B \sin(\omega T i + \beta) \end{cases} \quad (1)$$

式中, U_i 和 V_i 代表两个采样序列。

定义瞬时鉴相因子

$$P_i = U_i V_{i+1} - U_{i+1} V_i \quad (2)$$

当公式(1)中的两个信号实际上是同一个信号,只是采样后的序号有一个错位,即

$$\begin{cases} U_i = S_{i+j} \\ V_i = S_i \end{cases} \quad (3)$$

则

$$P_i(j) = A^2 \sin(j\omega T) \sin(\omega T) \quad (4)$$

公式(4)表明,鉴相因子与 ωT 之间存在函数关系,取两个不同的 j 相除可以消除比例因素的影响。

取 $j=2$ 和 $j=3$ 时,在 $2f \leq f_s$ 的情况下,反解

$$\frac{P_i(j=3)}{P_i(j=2)} = \frac{4\cos^2(\omega T) - 1}{2\cos(\omega T)}$$

得到 f 的表达式如下:

$$f = \begin{cases} \frac{f_s}{2\pi} \arccos\left(\frac{W + \sqrt{W^2 + 4}}{4}\right), & f \in \left(0, \frac{f_s}{4}\right] \\ \frac{f_s}{2\pi} \arccos\left(\frac{W - \sqrt{W^2 + 4}}{4}\right) + \pi, & f \in \left(\frac{f_s}{4}, \frac{f_s}{2}\right) \end{cases} \quad (5)$$

$f \in \left(0, \frac{f_s}{4}\right]$ 还是 $f \in \left(\frac{f_s}{4}, \frac{f_s}{2}\right)$ 可以通过 $P_i(j=2) = A^2 \sin(2\omega T) \sin(\omega T)$ 的正负来确定。所以通过时域

计算鉴相因子,反解可以得到信号频率。

实现可以采用如框图 4 所示的方法。

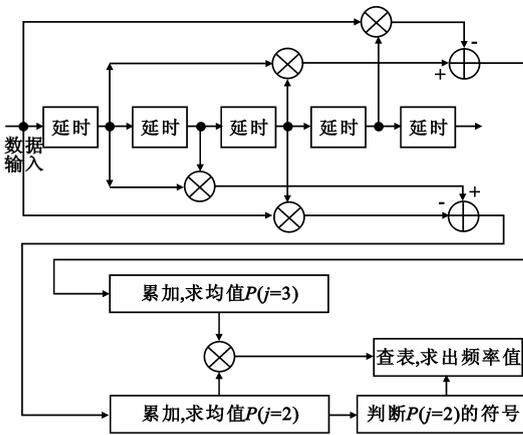


图 4 瞬时测频算法实现框图

Fig.4 Block diagram of IFM implementation

5.3 雷达信号脉内调制识别技术

雷达为了实现高分辨率、成像、低截获等技术要求,选择发射比较复杂的调制波形,如 LFM、步进频、相位编码等。雷达侦察干扰设备需要对雷达信号的调制方式进行识别,以便引导干扰,实现针对性更强、效果更有效的电子干扰。具体到弹载雷达侦察干扰设备,其侦察目的主要是为实施电子干扰服务的,因此,其侦察的首要任务是识别雷达的工作体制,确定是脉冲压缩体制还是常规脉冲,如果是脉冲压缩体制,需要给出雷达信号带宽的粗略值,以估算出目标雷达的距离分辨率。

借鉴雷达信号处理的方法,利用接收到雷达脉冲进行延时自相关处理,实现等效的匹配接收,计算匹配接收输出的脉冲宽度,即为目标雷达距离分辨率的近似值。实现原理框图如图 5 所示。

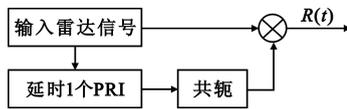


图 5 两次回波数据相关算法原理图

Fig.5 Block diagram of signal correlation delayed one PRI

设定仿真条件如下:采样速率 1 GHz,信号频率 121 MHz,脉冲宽度 $2 \mu s$,信噪比为 0 dB,雷达信号分别为常规雷达信号、LFM 信号和 BPSK 调相信号,其中 LFM 和 BPSK 调相信号的调制带宽为 10 MHz,Matlab 仿真结果如图 6 所示。

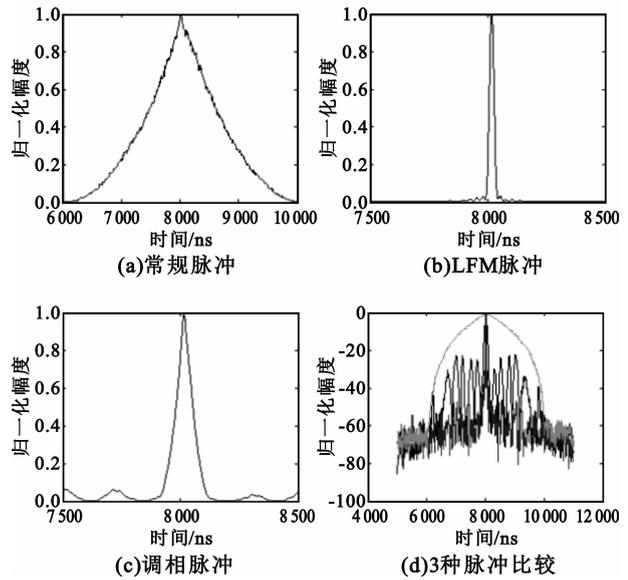


图 6 3种雷达脉冲匹配输出仿真

Fig.6 The simulation results of matching filter output about three type radar signals

5.4 干扰信号产生技术

干扰信号产生是在雷达信号侦收存储、参数测量、分选识别的基础上,利用存储到的雷达回波,根据雷达信号参数,生成针对性很强的干扰信号,以期达到有效的干扰效果。基于 DRFM 的干扰信号产生如图 7 所示。

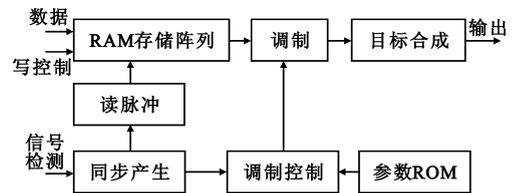


图 7 干扰信号产生原理框图

Fig.7 Block diagram of jamming signal generation

RAM 存储阵列完成雷达回波信号的存储,由一组双口 RAM 组成,在写控制信号的控制下,负责将一个完整的雷达脉冲存入 RAM 阵列中;同步产生子模块根据信号检测算法给出的雷达脉冲前沿,生成读脉冲信号和调制控制信号;在调制控制子模块的作用下,调制子模块读取存储于 ROM 中调制参数,对读脉冲控制下输出的雷达脉冲进行调制,在频域上施加干扰信息;最后目标合成子模块生成一系列时间间隔大致相等的雷达脉冲,输出干扰信号。

6 结束语

目前,针对弹载雷达侦察干扰设备的研究较少,

特别是设备总体设计方面。本文从弹载雷达侦察干扰设备的总体设计出发,结合弹载雷达侦察干扰设备的实际需求,依次对天线设计、接收机设计和信号处理硬件设计进行了论述,阐述了适合的技术体制;针对涉及的信号处理算法,着重从信号检测技术、瞬时测频技术、雷达信号脉内调制识别技术和干扰信号产生4个方面进行了详细论述,在算法选择上注重算法的实用性;给出了必要的算法仿真结果,表明算法可行,可以满足弹载雷达侦察干扰设备的实际需求。本文论述的设计方法及相关信号处理算法已成功应用于某型弹载雷达侦察干扰设备中,经过雷达对抗实验的验证,性能良好,达到了预期的效果,对于弹载平台雷达侦察干扰设备的设计具有指导意义。

参考文献:

- [1] 陆伟宁. 弹道导弹攻防对抗技术[M]. 北京:中国宇航出版社,2007.
LU Wei-ning. The Countermeasure Technology of Ballistic Missile Attack and Defence[M]. Beijing: China Astronautics Publishing House,2007. (in Chinese)
- [2] 姚广锋. 一种新型弹载引信天线的分析与设计[J]. 地面防空武器,2007(1):8-11.
YAO Guang-feng. Analysis and Design of a New Type Missile-borne Fuze Antenna[J]. Land-Based Air Defence Weapons, 2007(1):8-11. (in Chinese)
- [3] 邹涌泉,甘体国,李灿. Ka频段 TDRSS 弹载终端技术[J]. 电讯技术,2004,44(3):14-17.
ZOU Yong-quan, GAN Ti-guo, LI Can. The Technology of Missile-borne TDRSS Terminal Device in Ka Band[J]. Telecommunication Engineering,2004,44(3):14-17. (in Chinese)
- [4] 冯立松. UWB系统零中频超宽带接收机设计[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
FENG Li-song. Design of Zero-if Ultra Wideband Receiver for UWB System[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
- [5] Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals[J]. Proceedings of the IEEE,1967,55(4):523-531.
- [6] 胡富平. 基于能量检测的认知无线电协作频谱检测研究[D]. 武汉:华中科技大学,2010.
HU Fu-ping. Study on Cooperative Spectrum Sensing Based on Energy Detection for Cognitive Radio[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2010. (in Chinese)
- [7] 胡来招. 瞬时测频[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
HU Lai-zhao. Instantaneous Frequency Measurement[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)

作者简介:

侯利军(1979—),男,河南洛阳人,2004年于华中科技大学获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为雷达对抗技术。

HOU Li-jun was born in Luoyang, Henan Province, in 1979. He received the M. S. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2004. He is now an engineer. His research concerns radar countermeasure technology.

Email:lijun_hou_ly@163.com