

基于 DRFM 的脉冲雷达干扰信号产生方法

朱泽锋, 张军, 孟凯

(中国人民解放军91913部队, 辽宁 大连 116041)

摘要:基于 DRFM 的脉冲雷达干扰信号的产生方法产生的干扰信号具有距离连续可变、速度可控等特性,能在雷达回波信号中叠加多种噪声信号模拟复杂电磁环境,具有很强的通用性和扩展性,可用于雷达模拟训练、跟踪性能检测以及抗干扰实验。

关键词:DRFM; 脉冲雷达; 干扰信号

本文引用格式:朱泽锋,张军,孟凯. 基于 DRFM 的脉冲雷达干扰信号产生方法[J]. 兵器装备工程学报,2016(12):90-94.

Citation format:ZHU Ze-feng, ZHANG Jun, MENG Kai. Research on Generating Method of Pulse Radar Jamming Signal Based on DRFM[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2016(12):90-94.

中图分类号:TN95

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2016)12-0090-05

Research on Generating Method of Pulse Radar Jamming Signal Based on DRFM

ZHU Ze-feng, ZHANG Jun, MENG Kai

(The No. 91913rd Troop of PLA, Dalian 116041, China)

Abstract: A method of generating pulse radar target simulation signal based on DRFM was proposed. This approach was to generate a target analog signal with distance continuously variable and speed controllable, and can simulate complex electromagnetic environment in the radar echo signal by superimposing noise signal, and has strong versatility and scalability, and can be used in radar simulation training, detection and tracking performance and anti-jamming experiments.

Key words: DRFM; impulse radar; interference signal

作为在军事领域广泛使用的脉冲雷达,其效能发挥如何取决于操作人员的日常训练水平,但由于受训练环境因素不可控、实战场景难再现和动态合作目标少等诸多复杂因素的制约,实操人员在常规训练中不能针对突发事件进行有效训练^[1-2]。为有效解决存在的问题,提高装备训练水平,本研究提出了一种基于 DRFM 技术的脉冲雷达干扰信号产生方法。该方法首先对脉冲雷达搜索到的信号频谱进行有效存储,然后对对所记录的频谱进行延时和调频、调相处理,产生新的距离信息、速度信息和角度偏移信息等,且在模拟信号中可附加目标特征信息和复杂电磁环境信息,实现对雷达实时工作过程的全模拟,借此提升训练水平及检验雷达工作性能。

1 数字射频存储技术

数字射频存储(DRFM)技术可完整地存储接收雷达信号的相位信息等特征^[3]。其主要工作过程可分为以下几步:①将接收到的雷达信号下变频到基带,再将基带模拟信号转换为数字信号,采样存储于数据存储器中;②对存储器存储的信号进行延时和滤波等处理后,将其转换为模拟信号,然后对其进行上变频转换为射频型号,将信号输出。如果上、下变频器采用相同的本振源,则输出信号即为出入信号的模拟信号,可通过一定的设置实现模拟信号连续可调;③在利用 DRFM 技术产生模拟回波信号的基础上,采用数字噪声调制技术(如:噪声调幅、噪声调相等),可以实现模拟信号

上携带不同类型的噪声信息,实现对正常雷达回波信号的干扰;④结合数字卷积滤波器技术,可以实现对采样信号的数字滤波处理,应用该技术可以产生多个假目标干扰信号。原理框图如图 1。

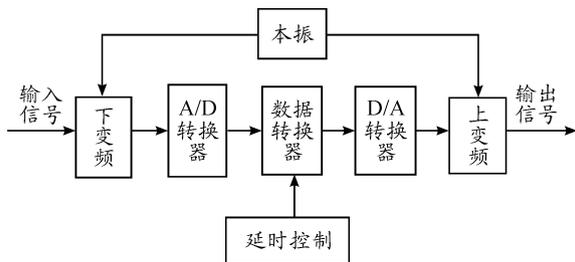


图 1 DRFM 方案原理框图

2 基于 DRFM 的干扰信号实现方法

2.1 总体框图

最初,DRFM 技术是用来实现数据的数字式存储、复制,通过研究的不断深入,研究人员发现 DRFM 可以用来存储脉冲压缩信号,并且该技术具有可以实现干扰信号和被干扰信号相干性的特点^[5]。

根据 Nyquist 采样定理^[4],若选择的采样速率满足要求,则采样信号将包含目标信号的所有信息;如果上、下变频器采用相同的采样速率,则输出射频信号与目标信号具有相同的特征信息,只是加入了一个连续可调的延迟。采用 DRFM 技术的干扰信号模拟总体框图如图 2。

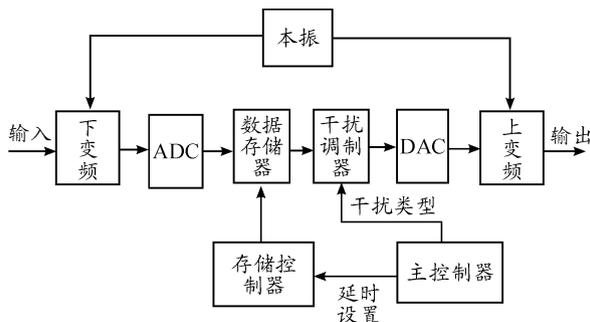


图 2 干扰信号模拟总体框图

改变本振信号的工作频率可以产生不同的采样信号;改变存储器内数据的写入和读出时间,可产生不同距离的干扰信号;通过改变干扰器调制器的参数信息可以产生不同的干扰类型,具体的工作频率和距离信息由主控制器产生。

2.2 采样数据全脉冲存储技术

全脉冲存储技术可以看作是将目标信号进行完整存储,工作时对存储信息进行处理,并按一定规律读出,经 D/A 转换后产生干扰信号。采用全脉冲存储技术产生的信号与输入信号具有相同的频率,即相参性很高^[6]。由于对目标信号的存储非常完整,因此可对其细微特征进行分析,所有该方法常用语对负责信号的存储。

文中主要研究对目标信号的模拟,运用 DRFM 技术对接收到的雷达信号进行采样存储^[7-8],根据需要叠加距离、速度和噪声信号,经延时后再还原成高频信号输出,以供日常训练时模拟目标信号使用,存储容量的大小取决于采样速率和脉冲宽度。脉冲雷达相对于连续波雷达而言数据量有限,所以只需要一定容量的存储器就可以解决数据存储问题。

2.3 可控延时电路设计

输入、输出数据的时延取决于读、写地址的时间间隔,因此,干扰信号的距离和精度取决于读地址和写地址之间的时间延迟。为了实现干扰信号距离大、精度高的要求,本文给出了一种将延迟时间分成低位和高位依次实现的方案。

同步双口存储器可用超高速集成电路硬件描述语言(VHDL)进行描述,通过控制写清零定时器产生的多个清零脉冲,可以实现多个不同延时^[9]。直接采样法可以实现干扰信号较大范围可控延迟量,即可实现干扰信号延时范围大、精度高(对应延迟量高位)的要求;干扰信号的精确延时(对应延迟量低位)可采用数字可编程定时器 AD9501 实现。为有效防止模拟回波信号与输入信号脉冲宽度不一致,文中采用 AD9501 技术对输出信号的脉冲宽度进行调整。可控延迟电路结构如图 3 所示。

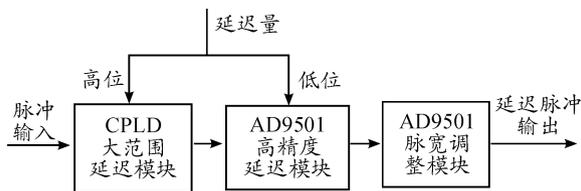


图 3 可控延时电路结构

3 干扰信号距离、速度和角度偏移信息的产生

3.1 单目标距离干扰

脉冲雷达是通过测量雷达发射信号 $s_T(t)$ 与接收信号 $s_R(t)$ 之间的延迟 t_r 测量目标之间的距离, $t_r = 2R/C$, C 为电磁波的传播速度。干扰信号是通过对接收到的雷达反射信号进行一定的调制和放大。

假设 R 为雷达接收机到目标的距离,则雷达接收机输出回波信号延时为 $t_r = 2R/C$; 设 R_f 为雷达接收机到假目标的距离,则假目标信号到雷达接收机的时延为 $t_f = 2R_f/C$, 当假目标与真目标之间的距离满足 $|R_f - R| > \delta f$ 时,便可产生形成距离假目标信号,如图 4 所示。

通常, t_f 由两部分组成,即

$$t_f = t_{f0} + \Delta t_f, t_{f0} = \frac{2R_f}{C} \quad (1)$$

其中: t_{f0} 是由雷达与目标模拟器之间的距离 R_f 所产生的时延; Δt_f 是目标模拟器接收到雷达发射信号后对其进行一定处理所产生的转发时延。

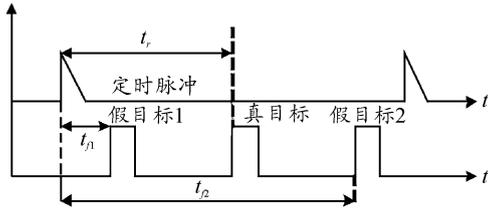


图4 脉冲雷达距离假目标干扰

基于 DRFM 技术的雷达干扰信号模拟器工作于应答模式时,可用于产生距离假目标干扰,其工作原理如下:首先模拟器接收机检测到雷达信号脉冲前沿,由此激发模拟器对检测信号进行采样处理,并对采样数据进行存储;然后对存储的采样数据进行一定的延时,并对读出数据进行所需调制后将模拟雷达回波信号发射出去。

对脉冲雷达实施延时转发干扰,将接收到的雷达信号延时 $1 \mu\text{s}$,并将其幅度放大 1.5 倍,干扰效果如图 5 所示。

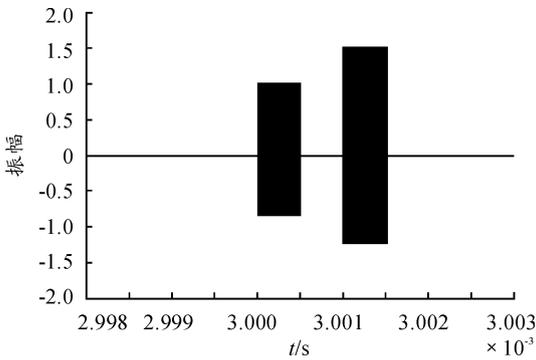


图5 对脉冲雷达的距离欺骗干扰

3.2 多目标距离干扰

若要产生多个假目标干扰信号对脉冲雷达进行有效干扰,可采用卷积滤波器实现。卷积滤波器包含 FIR (Finite Impulse Response, 有限脉冲响应) 和 IIR (Infinite Impulse Response, 无限脉冲响应) 两种实现方法,对于 FIR 滤波器

$$Y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} \omega(i)X(n - k_i), n = 0, 1, \dots \quad (2)$$

其中: N 表示假目标的数量; k 表示相邻假目标之间的时间差; $\{\omega(i)\}_{i=0}^{N-1}$ 表示各假目标之间的幅度比。当 k 常数, $\omega_i \equiv 1$ 时,可产生多个距离相同,幅度相等的假目标干扰信号。FIR 滤波器结构如图 6 所示。

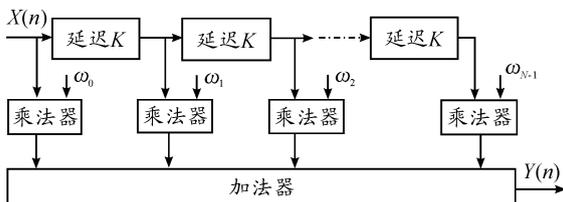


图6 FIR 滤波器结构框图

对于 IIR 滤波器

$$Y(n) = \omega_0 X(n) + \omega Y(n - k) = \omega_0 \sum_{i=1}^{N-1} \omega^{i-1} X(n - k_i), n = 0, 1, \dots \quad (3)$$

其中 k 表示相邻假目标之间的时间差, $\{\omega_0 \omega^{i-1}\}_{i=0}^{N-1}$ 为各假目标之间的幅度比,当 $\omega_i \equiv 1$ 时,则所产生的多个假目标的幅度相等。IIR 滤波器可以产生无限多个假目标干扰信号,即使当输入序列 $X(n)$ 为零时,输出序列 $Y(n)$ 依然可以持续下去。最简单的 IIR 滤波器采用一阶反馈网络,其典型结构如图 7 所示。

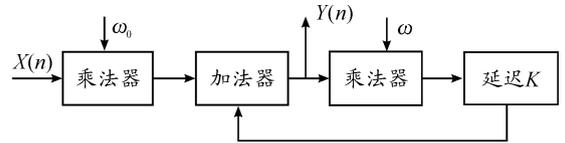


图7 IIR 滤波器结构框图

通过卷积滤波器产生的多个假目标干扰信号,很好地保存了雷达发射信号的特性,通过改变延迟时间和信号强度,可以产生多个不同位置、幅度不同的假目标干扰信号。由于假目标信号与雷达发射信号具有很强的相关性,因此假目标信号能够顺利通过雷达接收机的匹配滤波、脉冲积累等后端信号处理,从而可以产生多个不同峰值、距离不同的雷达回波信号。

本文仿真产生了 4 个假目标干扰信号,延迟时间分别取为 $1 \mu\text{s}$ 、 $3 \mu\text{s}$ 、 $5 \mu\text{s}$ 、 $7 \mu\text{s}$,幅度分别为真目标的 1.5、1.2、1.7、2 倍,干扰效果图如图 8 所示。从仿真图中可以看出,通过设置不同的延迟时间和信号强度,可以产生多个与雷达目标回波信号相似的假目标信号,且很难区分,因此此种方法能产生很好的干扰效果。

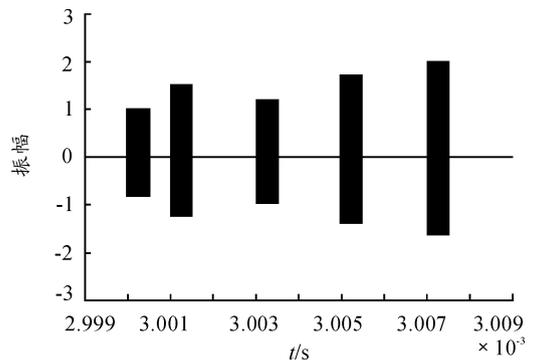


图8 对脉冲雷达的多假目标干扰

3.3 速度干扰

雷达通过测量目标回波信号与雷达发射信号之间的多普勒频移 f_d 来检测和跟踪目标的速度信息。因此,要想产生速度不同的假目标干扰信号,可以通过对雷达发射信号的相位进行调制来实现。通常主要通过对信号进行调相和调频实现对目标速度信息的改变。

通常采用数字正交混频的方式实现多普勒频率调制,实现方法如图9所示。

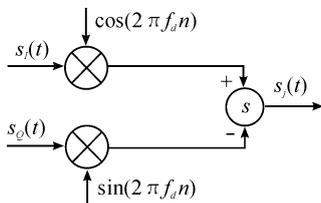


图9 多普勒频率调制

若采样后雷达的回波信号为： $s(t) = a(n) \cos[2\pi \cdot f_0 n + \phi(n)]$ ，则进行正交变换后的同相分量 (I) 为： $s_I(t) = a(n) \cos[2\pi \cdot f_0 n + \phi(n)]$ ，正交分量 (Q) 为： $s_Q(t) = a(n) \sin[2\pi \cdot f_0 n + \phi(n)]$ 。采用直接数字式频率合成器产生 $\cos(2\pi \cdot f_d n)$ 和 $\sin(2\pi \cdot f_d n)$ 的数字信号，然后将它们分别与同相分量 $s_I(t)$ 和正交分量 $s_Q(t)$ 相乘，并将得到的两路信号相减得：

$$\begin{aligned} s_j(n) &= s_I(n) \cos(2\pi \cdot f_d n) - s_Q(n) \sin(2\pi \cdot f_d n) = \\ &= a(n) \cos[2\pi \cdot f_0 n + \phi(n)] \cos(2\pi \cdot f_d n) - \\ &= a(n) \sin[2\pi \cdot f_0 n + \phi(n)] \sin(2\pi \cdot f_d n) = \\ &= a(n) \cos[2\pi \cdot (f_0 + f_d) n + \phi(n)] \end{aligned} \quad (4)$$

通过式(4)可以看出,输出信号 $s_j(n)$ 相比回波信号 $s(n)$ 多了一个多普勒频移分量 f_d 。由此可见,只要控制直接数字式频率合成器的输出频率,即可合成产生多个不同的多普勒频移,形成多个具有不同速度的假目标干扰信号。本研究仿真分析了脉冲雷达进行速度干扰的效果如图10所示。从图10可以看出,通过模拟雷达回波信号的幅度和多普勒频移,可产生多个与目标回波信号相似的假目标干扰信号。

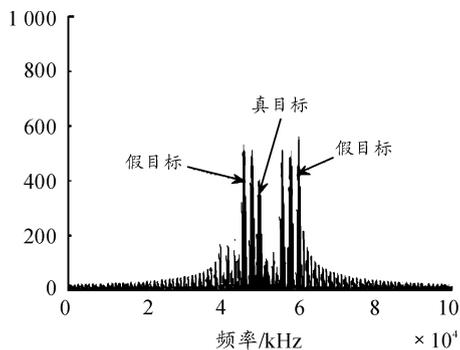


图10 对脉冲雷达的假多普勒频率干扰

3.4 角度干扰

图11为基于DRFM的角度欺骗干扰系统的基本组成,本系统由收发天线、伺服系统、侦查引导分机、干扰信号模拟分机、信号处理分机、雷达信号模拟分机、控制与显示分机、辅助系统等组成。

接收天线接收雷达的射频信号,经侦查引导分机检测和

测量辐射源信号后,分别提供给干扰信号模拟分机和信号处理分机,信号处理分机完成辐射源检测、信号调制分析和电波监测,提交控制与显示分机。干扰信号模拟分机根据控制命令输出小功率干扰信号,从发射天线辐射输出。雷达信号模拟分机用于系统自检。

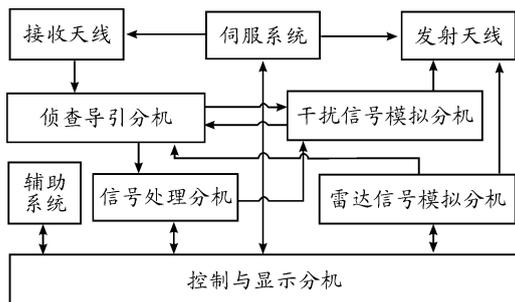


图11 系统的基本组成

图12为基于DRFM针对单脉冲雷达实施角度欺骗干扰的实现方式,首先利用DRFM技术对接收到的雷达信号进行复制、存储,经调制后输出干扰信号。该干扰信号经功分器分成两路信号,分别由发射天线发送出去。其中一路信号在发射前进行调相处理,使两路信号到达发射雷达时,其叠加波束能产生相位波前面的畸形,使其雷达天线瞄准轴偏离目标,从而产生干扰。

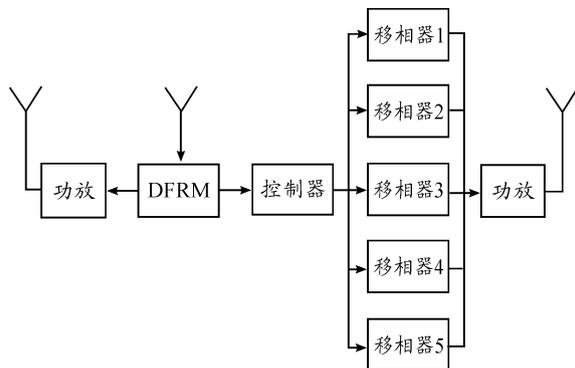


图12 基于DRFM的角度欺骗干扰实现方式

4 结束语

利用DRFM技术能够完整保留输入信号频率和相位等细微特征的优势,可实现对实战中脉冲雷达跟踪目标信号的频谱采样记录,并将采样信号作为目标信号模拟器的调制信号,通过叠加特定的时域、频域信息,可完整重现实战环境。另外,利用数字信号处理技术,可对存储的信息进行延时、调制等处理,实现将假目标信息、多普勒频移和各类干扰信号叠加至干扰信号上,模拟产生复杂电磁环境下的训练条件,便于装备操管人员在日常训练中熟悉实战环境,提升判别真假目标的能力。

参考文献:

- [1] 郭淑霞,周士军,高颖,等.复杂战场电磁环境建模与电磁态势可视化技术[J].西北工业大学学报,2015,33(3):406-412.
- [2] 游敬云,赖兰剑.电子战复杂电磁环境模拟技术[J].中国电子科学研究院学报,2014,10(05):517-520.
- [3] 牛刚,陈国顺,曹文斌.短波通信装备抗干扰性能测试平台研究[J].电子技术应用,2013,39(3):84-87.
- [4] 刘军,梁高波,周磊,等.超短波跳频电台复杂电磁环境适应能力评估方法[J].强激光与粒子束,2015,23(10):155-158.
- [5] 王伦文,孙伟,潘高峰.一种电磁环境复杂度快速评估方法[J].电子与信息学报,2010,32(12):2942-2947.
- [6] WEBBER G, CULP J, ROBINSON M. DRFM Require-Ments Demand Innovative Technology[J]. Micro-wave Journal, 1986, 29(2):91-104.
- [7] SHELDON B. HERSKOVITZ. A Sample of Digital RF Memories[J]. Journal of Electronic Defense, 1992, 15(2):43-47.
- [8] 张建科,党立坤,刁华伟.数字储频技术发展议[J].电子信息对抗技术,2010,25(4):39-43.
- [9] 包飞. DRFM 系统研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.

(责任编辑 杨继森)

(上接第44页)

参考文献:

- [1] 李广裕.战略导弹弹射技术的发展[J].国外导弹与航天运载器,1990(7):38-49.
- [2] LUAN YAN TSAN, CHYOU YAU-PIN, WANG TING. Numerical analysis of gasification perform via finite-rate model in a cross-type two-stage gasifier[J]. International Journal of Heat and Transfer, 2013, 57:558-566.
- [3] DHARAVATH M, MANNA P. CHAKRABORTY D. Thermo chemical exploration of hydrogen combustion in generic scramjet combustion[J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 24(1):264-274.
- [4] 迟宏伟,魏志军,王利和,等.固体燃料超燃冲压发动机燃烧室中 PMMA 自点火性能数值研究[J].推进技术,2014,35(6):799-808.
- [5] 李仁凤,乐贵高,马大为.燃烧产物特性对燃气弹射内弹道与载荷的影响研究[J].兵工学报,2016,37(2):245-252.
- [6] 胡晓磊,乐贵高,马大为,等.环形腔对燃气弹射发射筒二次反应影响数值研究[J].兵工学报,2015,36(6):1024-1032.
- [7] SHI T H. A new $k-\epsilon$ Eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3):227-238.
- [8] GUESSAB A, ARIS A, BOUNIF A. Simulation of turbulent piloted methane non-premixed flame based on combination of finite-rate/eddy-dissipation model[J]. Mechanika, 2013, 19(6):657-664.
- [9] 姜毅,郝继光,傅德彬.导弹发射过程三维非定常数数值模拟[J].兵工学报,2008,29(8):911-915.
- [10] 胡晓磊,乐贵高,马大为.燃气弹射发射筒内燃气-空气二次燃烧现象研究[J].弹道学报,2014,26(4):76-81.

(责任编辑 周江川)