

# LFM 脉冲压缩雷达的随机移频多假目标干扰技术研究

张克舟, 李青山, 张恒, 于卫刚  
(中国人民解放军63880部队, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 针对 LFM 脉冲压缩雷达回波信号距离和多普勒频率存在耦合这一特点, 在阶梯波移频干扰的基础上, 提出了随机移频的干扰方法。在雷达回波信号中心频率正负二分之一带宽内附加随机的多普勒移频分量, 可产生分布在真实目标周围的随机假目标。随机移频干扰技术产生的假目标随机性强, 使得雷达无法通过假目标频率补偿得出真实目标的位置, 并且随机移频产生的假目标相对于雷达是部分适配的, 因此假目标在一定程度上会展宽, 当附加随机移频点接近于雷达中心频率时, 产生的假目标甚至可以覆盖真实目标, 从而达到较好的干扰效果。

**关键词:** 线性调频信号; 脉冲压缩雷达; 随机移频干扰

**中图分类号:** V271.4; TN958 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)08-0106-04

## Random Frequency-Shift for Multi-False-Target Jamming of LFM Pulse Compression Radar

ZHANG Ke-zhou, LI Qing-shan, ZHANG Heng, YU Wei-gang  
(No. 63880 Unit of PLA, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** LFM radar signal has coupling between the range and Doppler frequency. Based on the method of ladder wave jamming, a method of random frequency-shift jamming was proposed. Random Doppler frequency-shift component was added in center frequency bandwidth of the positive and negative half, and false targets could be generated, randomly distributed around the real target. Random frequency-shifting technique has high randomness, thus the radar can't obtain the position of the real target through frequency compensation of multi-false-target. The false-target generated by random frequency-shifting is partially adaptive to the radar, thus the false-target range can be broadened. When the random frequency-shifting is close to radar's center frequency, the generated false-targets can even cover the real-target and achieve very good effect.

**Key words:** Linear Frequency Modulated pulse(LFM); pulse compression radar; random frequency-shift jamming

### 0 引言

线性调频信号(LFM)频率与时间之间的线性关系使其有很大的时宽带宽积, 保证较大的脉宽下依然可以得到很高的距离分辨率。同时因为其在接收回波时的匹配滤波特性使得干扰信号得不到相应的处理增益<sup>[1]</sup>, 大大提高了 LFM 脉压雷达的抗干扰能力。但是线性调频信号也有其固有缺点, 由线性调频信号的模糊函数可知, 线性调频信号存在着距离和多普勒之间的耦合<sup>[2]</sup>, 使得当回波发生多普勒移频时, 会产生测距误差。对 LFM 脉冲压缩雷达干扰时, 利用数字射频存储器(DRFM)转发雷达信号, 并在转发的信号中增加

一个多普勒移频分量, 就会使雷达产生一个假目标。根据增加的多普勒分量的正负情况可推断假目标或在目标之前, 或在目标之后<sup>[3]</sup>。

利用 LFM 脉冲压缩雷达回波信号距离-多普勒频率存在强耦合的特点, 文献[4]提出了采用移频干扰的技术方法, 文献[5]在此基础上加以改进, 提出了阶梯波、线性函数移频和线性分段移频的方法, 本文在以上两篇文献的基础上, 提出随机移频的干扰技术方法。

### 1 移频干扰模型

DRFM 是对 LFM 信号进行相干存储和转发的最有效手段, 首先通过 DRFM 对信号进行相干存储, 在转发时加入多普勒移频, 从而达到对 LFM 脉压雷达移频干扰的目的<sup>[6]</sup>, 原理如图 1 所示。

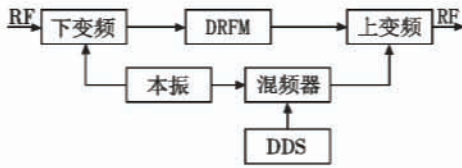


图 1 DRFM 移频干扰原理

Fig.1 Frequency-shifting principle based on DRFM  
在单个周期内 LFM 的信号可表达为

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} e^{j2\pi(f_0 t + 1/2 K t^2)}, 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

式中:  $f_0$  为载频中心频率;  $K$  为调频斜率, 且  $K = \frac{B}{T}, B$  为 LFM 的信号带宽,  $T$  为脉冲宽度。

雷达信号在接收机中进行脉冲压缩, 根据匹配滤波理论, LFM 回波信号对应脉冲压缩网络中匹配滤波器的单位冲击响应为

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} e^{-j2\pi[f_0(t_0 - t) + 1/2 K(t_0 - t)^2]} \quad (2)$$

由图 1 可知, 在 DRFM 移频干扰中, 干扰信号相比于雷达回波信号, 其移频后干扰信号可以表示为

$$j(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} e^{j2\pi(f_0 t + f_1 t + 1/2 K t^2)}, 0 \leq t \leq T \quad (3)$$

式中,  $f_1$  为干扰信号附加的频移量。

干扰信号经过匹配滤波器后的响应为

$$j_0(t) = j(t) * h(t) = \frac{1}{T} e^{j2\pi(f_1 t - f_1 t_0 + f_1 t_0)} \cdot e^{-j\pi K(t_0^2 - t^2)} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi(K t_0 - f_1 - K t)\tau} d\tau \quad (4)$$

根据卷积的平移翻转特性, 可将积分限变为

$$j_0(t) = \begin{cases} \frac{1}{T} e^{j2\pi(f_1 t - f_1 t_0 + f_1 t_0)} \cdot e^{-j\pi K(t_0^2 - t^2)} \int_{t_0 - T}^t e^{j2\pi(K t_0 - f_1 - K t)\tau} d\tau, 0 < t < T \\ \frac{1}{T} e^{j2\pi(f_1 t - f_1 t_0 + f_1 t_0)} \cdot e^{-j\pi K(t_0^2 - t^2)} \int_{t - T}^{t_0} e^{j2\pi(K t_0 - f_1 - K t)\tau} d\tau, T < t < 2T \end{cases} \quad (5)$$

在匹配滤波器中,  $t_0$  为信噪比最大时刻, 在此处选择  $t_0 = T$ , 由此式(5)转化为

$$j_0(t) = \frac{\sin[\pi B(t - T + \frac{f_1}{K})(1 + \frac{t - T}{T})]}{\pi B(t - T + \frac{f_1}{K})(1 + \frac{t - T}{T})} \cdot (T - |t - T|) \cdot e^{j2\pi[(f_0 + \frac{f_1}{2} + \frac{f_1}{2})t - T(f_0 + \frac{f_1}{2})]}, 0 < t < 2T \quad (6)$$

由式(6)可知, 移频干扰信号经匹配滤波后输出包络

$$\frac{\sin[\pi B(t - T + \frac{f_1}{K})(1 + \frac{t - T}{T})]}{\pi B(t - T + \frac{f_1}{K})(1 + \frac{t - T}{T})} \cdot (T - |t - T|), \text{载频}$$

为  $f_0 + \frac{B}{2} + \frac{f_1}{2}$ 。

图 2 为脉宽 10  $\mu\text{s}$ , 调频带宽 1 MHz 的 LFM 信号

在不同移频下的匹配滤波器输出信号包络, 由图 2 可知, 当移频量  $f_1 = 0$  时, 压缩信号出现在  $T = 1$  时刻, 当  $f_1$  不为 0 时, 压缩信号在时域上发生移动, 峰值移动到  $t = T - f_1/K$  处, 其信号幅度、包络的宽度都和移频量  $f_1$  成线性关系。在这里要注意的是, 移频量越大, 信号失配就会越严重, 在图 2 中, 当信号移频量  $f_1 = 0.6 \text{ MHz}$  时, 信号包络幅度已经下降为未移频信号包络的 2/5, 从理论角度分析, 移频范围为  $-B \leq f_1 \leq B$ , 但考虑包络幅度的衰减因素, 移频范围应适当减小, 因此移频的范围一般选取在  $-0.5B \leq f_1 \leq 0.5B$  之间。

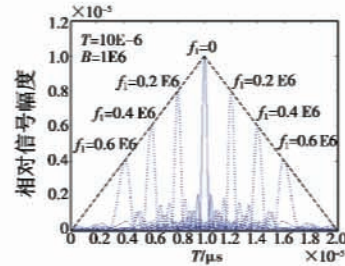


图 2 时域不同移频下的匹配滤波输出信号包络

Fig.2 Signal envelope of different frequency shift of the matched filter output

由式(6)可知, 真目标的回波中心频率为  $f_0 + \frac{B}{2}$ ,

假目标的回波中心频率为  $f_0 + \frac{B}{2} + \frac{f_1}{2}$ , 而信号载频中的移频量  $\frac{f_1}{2}$  就是移频干扰的特征, 在移频干扰中, 要注意对移频量特征的隐藏, 防止被雷达所利用, 如单一移频量干扰, 若移频干扰的功率小于真实目标功率, 可以通过移频量的测量直接将假目标信号滤除, 若假目标信号功率强于真实目标功率, 将真实目标淹没, 依然可以通过移频量的测量, 在假目标信号的基础上进行距离补偿, 测算出真实目标的位置, 因此, 在进行移频干扰时, 一般让移频量产生一些变化, 并且对移频量限定一定的范围, 尽可能防止雷达测量出移频量<sup>[7]</sup>。

## 2 随机移频干扰研究

文献[5]中提出了几种改进的移频干扰方法, 包括阶梯波移频、线性函数移频、分段线性函数移频等, 可产生多假目标或者某时间段内的覆盖干扰, 但这种方法有一个共同的缺点, 移频变化呈一定的规律性。以阶梯波移频干扰为例, 移频频率变化如图 3 所示。将整个脉冲等距分为  $N$  段, 各个脉冲段所附加的频移呈阶梯递增方式, 此种方式生成的假目标全部等距离出现在真目标之前, 由于移频量呈现阶梯变化规律, 依然可通过移频量补偿的方法来消除多假目标干扰。即使未将假目标去除, 在人工判读时, 也很容易从假目标中区分出真实目标。

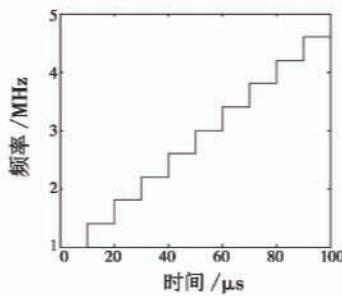


图3 阶梯波移频干扰

Fig. 3 Step wave frequency-shift jamming

针对以上移频干扰的缺点,本文提出了随机移频的方法,同样将整个脉冲分为 $N$ 段,但是每小段脉冲附加的移频量却是一个随机值,考虑到移频量过大会导致信号失配严重,因此将随机移频的范围选取在 $-0.5B \leq f_i \leq 0.5B$ 之间。

因为随机移频需要的值有可能是个负值,而直接数字式频率合成器(DDS)无法产生负频率,所以在本振进行下变频混频时,需要做适当的调整,将中心频率由原来的 $f_0$ 调整为 $f_0 - 0.5B$ ,此时可以让DDS的移频值范围改为 $0 \leq f_i \leq B$ ,等同于移频范围为 $-0.5B \leq f_i \leq 0.5B$ 。

干扰机的随机移频量由DDS控制,而随机频率控制码是DDS随机频率跳变的核心。伪随机M序列只需要具有反馈功能的移位寄存器就能实现,且便于用FPGA芯片产生<sup>[8-9]</sup>,因此本文选取M序列作为DDS频率随机变化的频率控制码。

在干扰时,根据不同的雷达带宽,将脉冲分为 $N$ 段( $N$ 值需针对脉冲宽度进行调整),对应 $N$ 段脉冲,利用M序列产生器产生 $N$ 个不同的伪随机频率控制码,将这 $N$ 个频率控制码存入RAM中,控制DDS产生 $N$ 个随机频率点,此处要注意,在产生这 $N$ 个伪随机频率控制码后,需要将这 $N$ 个伪随机控制码反复加载在DDS上,也就是说,多个雷达脉冲可能要用相同的 $N$ 个伪随机频率控制码,因为如果不停地更新伪随机频率控制码,随机脉冲跳变频率过高,雷达很可能将随机移频后的脉冲作为虚警剔除。

### 3 仿真实验

本文对阶梯波移频干扰和随机移频干扰进行了对比仿真,雷达脉冲宽度 $100 \mu\text{s}$ ,线性调频带宽 $10 \text{ MHz}$ ,两种干扰方式都将 $100 \mu\text{s}$ 脉宽分为 $10$ 段,进行分段移频干扰。阶梯波移频中, $10$ 段脉冲的移频量分别为: $5 \text{ MHz}$ 、 $4 \text{ MHz}$ 、 $3 \text{ MHz}$ 、 $2 \text{ MHz}$ 、 $1 \text{ MHz}$ 、 $-1 \text{ MHz}$ 、 $-2 \text{ MHz}$ 、 $-3 \text{ MHz}$ 、 $-4 \text{ MHz}$ 、 $-5 \text{ MHz}$ 。随机移频中 $10$ 段脉冲的移频量由M序列随机生成。仿真结果如图4、图5所示。

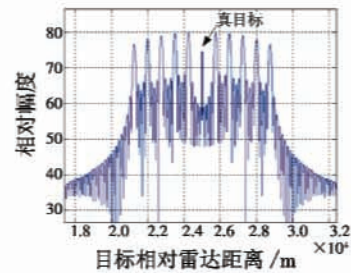


图4 阶梯波移频干扰

Fig. 4 Step wave frequency-shift jamming

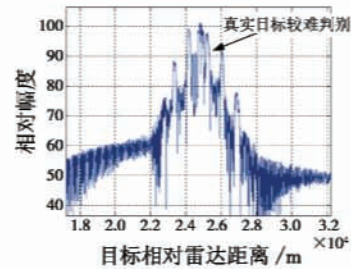


图5 随机移频干扰

Fig. 5 Random frequency-shift jamming

由仿真可知,移频后每段脉冲在脉压时产生失配现象,因此假目标相对于真实目标展宽了,在阶梯波移频干扰中,由于移频有一定的规律,假目标均匀分布在真实目标周围,真实目标依然可以识别;在随机移频干扰中,由于移频的随机性,加之假目标的展宽,真目标被夹杂在随机分布的假目标中,得到更好的干扰效果。

### 4 结束语

本文利用LFM体制雷达回波信号距离-多普勒移频存在强耦合的特点,对移频干扰的方法进行了改进,提出了基于M序列的随机移频干扰。随机移频使得雷达无法通过对假目标进行频率补偿得出真实目标位置,且随机移频干扰产生的假目标随机分布在真目标周围,加之其展宽特性,可达到较好的干扰效果。

### 参考文献

- [1] 刘忠,刘建成,王雪松,等. 间歇采样转发干扰信号分析[J]. 电子对抗,2007(6):19-23.  
LIU Z, LIU J C, WANG X S, et al. Analysis on interrupted-sampling repeater jamming signal[J]. Electronic Warfare, 2007(6):19-23.
- [2] RICHARDS M A. 雷达信号处理基础[M]. 邢孟道,王彤,李真芳,译. 北京:电子工业出版社,2008:143-147.  
RICHARDS M A. Fundamentals of radar signal processing [M]. Translated by XING M D, WANG T, LI Z F. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2008:143-147.
- [3] 王玉军. 线性调频雷达干扰新技术及数字干扰合成的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.

- WANG Y J. Studies of jamming against the radar based on linear frequency modulation signals and the digital jamming synthesis[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [4] 杨绍全, 张正明. 对线性调频脉压雷达的干扰[J]. 西安电子科技大学学报, 1991(3): 24-30.  
YANG S Q, ZHANG Z M. Jamming of LFM pulse compression radar [J]. Journal of Xidian University, 1991(3): 24-30.
- [5] 刘忠. 基于 DRFM 的线性调频脉冲压缩雷达干扰新技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.  
LIU Z. Jamming technique for countering LFM pulse compression radar based on digital radio frequency memory [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [6] 吕波, 冯起, 袁乃昌. 对 LFM 脉冲压缩雷达的移频压制干扰技术研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(1): 9-12.  
LÜ B, FENG Q, YUAN N C. A study on frequency-shifting blanket jamming to LFM pulse-compression radar [J]. Modern Radar, 2009, 31(1): 9-12.
- [7] 吴晓芳, 王雪松, 卢焕章. 对合成孔径雷达的脉间分段移频干扰[J]. 航天电子对抗, 2010(1): 53-57.  
WU X F, WANG X S, LU H Z. Interpulse subsection-shift-frequency jamming to SAR [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2010(1): 53-57.
- [8] 束礼宝, 宋克柱, 王砚芳. 伪随机数发生器的 FPGA 实现与研究[J]. 电路与系统学报, 2003(6): 121-124.  
SHU L B, SONG K Z, WANG Y F. The implementation and research on pseudo random number generators with FPGA [J]. Journal of Circuits and System, 2003(6): 121-124.
- [9] 王会华, 李宝平. m 序列发生器的设计与实现[J]. 北京电子科技学院学报, 2007, 15(2): 58-61.  
WANG H H, LI B P. Design and realize of m sequence generator [J]. Journal of Beijing Electronic Science and Technology Institute, 2007, 15(2): 58-61.
- 
- (上接第 101 页)
- 外与激光工程, 2004, 33(2): 164-168.  
ZHANG C, ZHANG T X. Research on detection and recognition method of moving targets [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(2): 164-168.
- 
- (上接第 105 页)
- [3] 高晖, 陈欣, 夏云程. 无人机航迹规划综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(2): 35-38.  
GAO H, CHEN X, XIA Y C. Introduction of route planning for unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 33(2): 35-38.
- [4] SURESH M, GHOSE D. Role of information and communication in redefining unmanned aerial vehicle autonomous control levels [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2010, 224(2): 171-197.
- [5] ARMANDO A N, MACHARET D G, CAMPOS M F M. On the generation of trajectories for multiple UAVs in environments with obstacles [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, 2010, 57(1-4): 123-141.
- [6] SVEN K, MAXIM L. Real time adaptive A\* [C] // Proceeding of the International Conference on Autonomous Agents, Hakodate, Japan, ACM, 2006: 281-288.
- [7] 李璠, 郝应光. 基于改进混沌遗传算法的无人机航迹规划[J]. 光电与控制, 2012, 19(8): 15-19.  
LI F, HAO Y G. Path planning of UAVs based on improved chaotic genetic algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(8): 15-19.
- [8] 熊辉, 沈振康, 魏急波, 等. 低信噪比运动红外点目标的检测[J]. 电子学报, 1999, 27(12): 26-29.  
XIONG H, SHEN Z K, WEI J B, et al. Moving infrared low SNR target detection algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(12): 26-29.
- 
- [8] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of the IEEE International conf on Neural Networks, Perth, Australia, IEEE, 1995: 1942-1948.
- [9] COELHO L D S. A quantum particle swarm optimizer with chaotic mutation operator [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2008, 37(5): 1409-1418.
- [10] JIN Y S, KNOWLES J, LU H M, et al. The landscape adaptive particle swarm optimizer [J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 295-304.
- [11] 刘月, 魏瑞轩, 刘敏, 等. 用改进变异粒子群算法实现突发威胁下的无人机航迹规划[J]. 光电与控制, 2010, 17(1): 22-25.  
LIU Y, WEI R X, LIU M, et al. Path planning of UAVs based on improved variant PSO algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(1): 22-25.
- [12] 于会, 于鑫, 李伟化. 基于粒子群优化算法的航迹规划与重规划[J]. 计算机工程, 2009, 35(15): 206-207.  
YU H, YU X, LI W H. Route planning and re-planning based on PSO algorithm [J]. Computer Engineering, 2009, 35(15): 206-207.
- [13] 郑昌文. 飞行器航迹规划方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.  
ZHENG C W. Research on air vehicle path planning algorithms [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003.