

# 功率角度的密集假目标压制干扰分析

杨继庚, 董文锋

(空军预警学院, 武汉 430019)

**摘要:** 以分析密集假目标的压制干扰效果为目的,提出了一种提高密集假目标干扰效果的干扰方法。首先研究了线性调频信号的间歇采样多假目标经过脉冲压缩后的功率分布,然后分析了密集假目标压制干扰对 CA-CFAR 检测的影响,最后根据研究的功率分布结果,通过调整相关参数使密集假目标的压制干扰效果最优。结果表明,该方法能大大提高干扰效果。

**关键词:** 密集假目标; 功率分布; 干扰; 线性调频; 间歇采样

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2016)06-0068-04

## Analysis to Blanket Jamming Effect of Dense Deceptive Targets Based on Power

YANG Ji-geng, DONG Wen-feng

(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** For the purpose of analyzing the blanket jamming effect of the dense deceptive targets, a new jamming method for improving the jamming effect of the dense deceptive targets is proposed. Power distribution of multiple deceptive targets after pulse compression, generated by intermittent sampling of Linear Frequency Modulation (LFM) radar signals, is analyzed firstly. Then, the influence of dense deceptive targets jamming on radar detection of CA-CFAR is analyzed. The ideal jamming effect is achieved by adjusting related jamming parameters based on power distribution of multiple deceptive targets. The simulation results show that this method can improve the jamming effect greatly.

**Key words:** dense deceptive target; power distribution; interference; Linear Frequency Modulation (LFM); intermittent sampling

### 0 引言

雷达干扰与抗干扰的激烈角逐,催化数字存储式转发干扰技术(DRFM)的诞生。存储式转发干扰技术有很多,如卷积相干干扰<sup>[1]</sup>、移频干扰<sup>[2]</sup>、复制转发干扰<sup>[3-4]</sup>、间歇采样干扰<sup>[5-7]</sup>等,本文选择间歇采样转发干扰进行研究。间歇采样转发干扰作为一种新型干扰信号样式正处于研究阶段,装备应用非常少,研究间歇采样的文献很多,大部分集中于信号样式的产生,鲜有从功率上定量研究间歇采样转发干扰的干扰效果。

### 1 干扰信号产生

假设间歇采样信号是矩形脉冲串函数,设其脉宽

为  $\tau$ , 重复周期为  $T_s$ , 则可表示为

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_s) \quad (1)$$

设雷达发射信号为线性调频信号,即

$$x(t) = \text{rect}\left(\frac{t-T}{T}\right) \exp j2\pi(f_0 t + kt^2/2) \quad (2)$$

式中,  $T$  为脉冲宽度。则采样后的信号为

$$x_s(t) = p(t)x(t) \quad (3)$$

根据文献[1]可以知道信号  $x_s(t)$  经过脉冲压缩后的结果为

$$y_s(t) = \frac{\tau}{T_s} y(t) + \frac{2\tau}{T_s} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\pi f_s \tau)}{n\pi f_s \tau} \cos 2\pi n f_s t \cdot y(t) \quad (4)$$

式中,  $y(t) = x(t)h(t)$  表示原始雷达信号经过脉压后的输出。通过上述方程可以看出,干扰信号经过脉压后的第一项与原始信号完全相同,唯一不同的是幅度变为原来的  $\tau/T_s$  倍,把这个定义为主干扰信号,后面

的求和部分表示将原始发射信号频谱进行了  $nf_s$  频移,且每次频移时频率有正负,即各假目标干扰信号的间隔为  $\Delta t_0 = T f_s / B = B / k$ ,  $B$  为频带宽度,  $k$  为调频斜率。各求和因子的幅度为归一化幅度  $\sin(n\pi f_s \tau) / n\pi$ 。

图1所示为不同采样占空比下,  $T_s / T = 0.45$ 、频谱宽度为 1 MHz 的假目标分布。

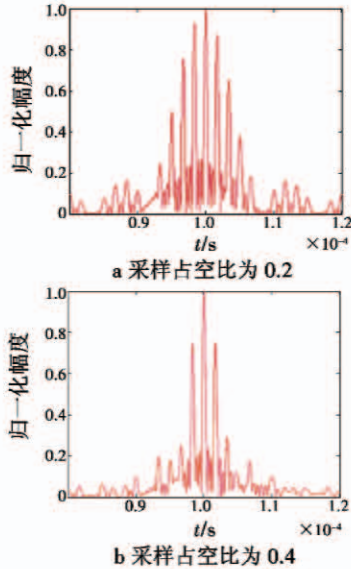


图1 不同占空比下假目标分布

Fig.1 False target distribution under different sampling duty cycle

可以看出,干扰假目标的幅度以主假目标为中心依次递减。采样不同占空比,产生的假目标幅度分布也不同,采样占空比越小,幅度递减越小,大功率假目标个数越多。

## 2 干扰功率分布

文献[5]虽然给出式(4),但没有对其功率分布做进一步分析。由式(4)可知,假目标信号的个数为无穷多个。设干扰机发射功率为  $P$ ,脉冲压缩后的总功率为  $P'$ ,各(同侧)假目标信号的功率分别为  $P'_0, P'_1, P'_2, \dots, P'_\infty$ ,幅度为  $A'_0, A'_1, A'_2, \dots, A'_\infty$ 。因为脉压后各假目标信号的脉宽均为  $T' = 1/B$ ,根据能量守恒有

$$PT \frac{\tau}{T_s} \approx \frac{1}{B} (P'_0 + \sum_{n=1}^{\infty} 2P'_n) = \frac{P'}{B} \quad (5)$$

于是

$$P' \approx PT \frac{\tau B}{T_s} \quad (6)$$

因为功率之比等于幅度的平方比,即  $\frac{P'_n}{P'_0} = \frac{A_n'^2}{A_0'^2}$ ,所以有

$$P' = P'_0 \left( 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2 \left( \frac{\sin n\pi f_s \tau}{n\pi f_s \tau} \right)^2 \right) \quad (7)$$

表1表示脉压之后主干扰信号与两侧的  $2n$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) 个副干扰信号功率之和与压缩后总功率

的比值,表中结果为达到一定功率比值时的副假目标个数。从表中可以看出,  $f_s \tau$  (采样占空比) 越大,脉压后的信号能量越集中,当采样占空比为 1 时采样的信号是完整的发射信号,所以脉压后能量全部集中在主干扰信号上,也就是没有产生副干扰信号。相反,采样占空比越小,能量越分散,产生的假目标越多。

表1 不同采样占空比下间歇采样信号功率分布

Table 1 Jamming power distribution under different sampling duty cycle

功率比/%	$f_s \tau$									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
85	12	6	3	2	1	1	1	1	0	0
90	16	8	6	4	3	2	2	2	0	0
95	40	20	12	8	8	6	4	4	4	0

## 3 干扰信号对 CA-CFAR 的影响

文献[8-11]研究表明,密集假目标密集程度越高,使大量假目标落入恒虚警检测单元、抬高检测门限、达到干扰的效果与压制干扰的效果越相似。

当没有密集假目标干扰(纯噪声背景)时,单元平均恒虚警的门限为<sup>[12]</sup>

$$V_0 = \frac{K}{2N} \sum_{i=1}^{2N} x_i = K\sigma^2 \quad (8)$$

式中:  $K$  为标称因子;  $N$  为单边参考单元个数;  $\sigma^2$  为噪声功率。当存在干扰时,参考单元的雷达新检测门限为

$$V_1 = \frac{K}{2N} \left( \sum_{i=1}^{2N} y_i + \sum_{i=1}^{2N} x_i \right) = \frac{K}{2N} \cdot (P_j + 2N\sigma^2) \quad (9)$$

由于 CFAR 参考单元数量有限和密集假目标的无限时长,所以仅有大部分干扰信号进入 CFAR 参考单元,设进入接收机的干扰功率占总功率的比值为  $\eta$ , 则

$$V_1 = \frac{K}{2N} \cdot \left( \eta \sum_{n=1}^{\infty} P'_n + 2N\sigma^2 \right) = \frac{K}{2N} \cdot (\eta PTB\tau / T_s + 2N\sigma^2) \quad (10)$$

令  $R_{j,N} = \frac{\eta PTB\tau}{(2T_s N)\sigma^2}$ , 则门限电平为  $V_1 = K(R_{j,N} + 1)\sigma^2$ 。

定义在密集假目标干扰的作用下门限加权系数  $K_1$  为

$$K_1 = (1 + R_{j,N}) \cdot K \quad (11)$$

则在密集假干扰的作用下雷达的检测概率数学期望值为

$$P_d = \left( 1 + \frac{K_1}{2N(1 + R_{s,N})} \right)^{-2N} =$$

$$(1 + (-1 + P_{fa}^{-1/2N})(1 + R_{j,N}) / (1 + R_{s,N}))^{-2N} \quad (12)$$

可以看出干噪比越大,发现概率越小。

## 4 相关参数调整

下面具体分析如何调节相关参数,才能使落入参考单元的干扰功率达到最大。当假目标平均分布在参



考单元的两侧,可以干扰不同类型的CFAR检测器<sup>[2]</sup>。这可以通过两次转发实现,第一次转发的信号在目标前侧(前置干扰),第二次转发的信号在目标后侧(后置干扰)。

干扰机间歇采样未经延时处理产生的干扰信号分布在干扰机周围,为了使干扰信号落入目标的参考单元,需要对假目标干扰信号进行相应的延时处理。进行延时之前,需要分析落入参考单元假目标的个数。 $N_j$ 为落入参考单元中功率比值为 $\eta$ 的假目标中主假目标一侧的副假目标个数,参考单元中总的假目标个数为 $2N_j + 1$ 个,假目标总间隔为 $2N_j T/BT_s$ ,检测单元一侧的参考单元长度为 $N_{CFAR}/2B$ 。总功率比值为 $\eta$ 的假目标时间总宽度需满足

$$2N_j T/BT_s < N_{CFAR}/B \quad (13)$$

通过简化得到

$$N_j < N_{CFAR} T_s/2T \quad (14)$$

根据上式也可以看出,密集假目标占据参考单元的宽度与频谱宽度没有关系,只与雷达发射信号时宽和采样周期有关系, $T_s/T$ 越大,落入参考单元的假目标数 $N_j$ 越大,干扰功率也就越强。根据文献[1], $T_s/T \geq 50\%$ 时,各假目标信号容易发生混叠,使各假目标信号波形和幅度发生变化,容易被雷达识别,所以 $T_s/T$ 取值接近并且小于0.5。

表1数据表明, $f_s \tau$ 越小,产生的假目标幅度递减越小,则参考单元的大功率假目标(主假目标周围的假目标)越密集,越能达到压制干扰的效果。但是,同时落入参考单元假目标的总功率会越小,并且这样会使得检测单元的假目标功率相应增大,所以 $f_s \tau$ 的选择应该根据具体雷达的参考单元数量决定。

在实际干扰中,干扰机位于雷达与目标之间的某一处,干扰机转发的干扰信号必须通过延时处理才能使假目标信号落入目标周围的参考单元。若第一次干扰机接收到雷达信号后通过延时转发前置干扰,则假目标位于目标检测单元前侧,通过延时转发后置干扰后,假目标位于目标检测单元后侧。

仿真参数为: $T = 100 \mu\text{s}$ , $T_s = 0.45T$ , $N_{CFAR} = 32$ , $R_{j,N} = 14 \text{ dB}$ , $B = 2 \text{ MHz}$ ,CFAR单边时域带宽为 $9 \mu\text{s}$ ( $N_{CFAR}/2 + 2$ )/ $B = 9 \mu\text{s}$ 。

参考单元对应区间为 $91 \sim 109 \mu\text{s}$ ,从图2a可以看出,第3个副假目标处于恒虚警参考单元内,对比表格可以看出,有85%的能量落入参考单元。由图2b可以看出,落入参考单元的假目标个数与图2a中一致,对比表1可知,此时的 $\eta$ 远小于85%。同时,检测单元(目标所在单元)的假目标幅度由于前置和后置干扰的叠加,幅度变得很大,一定程度上加大了雷达的信噪比。

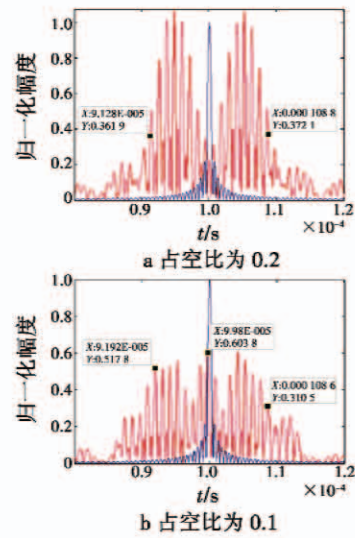


图2 一次前置转发和后置转发假目标分布

Fig.2 False target distribution of two times retransmitted jamming

为了进一步加大进入恒虚警参考单元的干扰功率,可增多转发次数。根据前面的分析可知,由于参考单元长度有限,第二次前置(或者后置)干扰必须与第一次间隔很近才能使有效干扰功率与第一次的干扰功率接近,则最佳干扰方式为第二次干扰信号各假目标信号刚好与第一次相互交错,也就是在第一次转发的时延基础上再延时假目标间隔的一半,即 $\Delta t_{\text{half}} = f_s T/2B$ 。

重复转发方式转发间隔最小为 $\tau$ <sup>[5]</sup>,第二次前置干扰和后置干扰分别为转发信号的第三次和第四次,即相比第一次转发时有 $2\tau$ 的时间间隔。因为采用这种方式会使得大部分假目标信号落入参考单元之外,所以需对这两次转发的信号添加额外的频移以达到时移效果。因此后两次转发信号添加的频移满足如下关系:

前置干扰频移 $f_{\text{前}}$ 为

$$\Delta t_{d2\text{前}} = \Delta t_{d1\text{前}} - \Delta t_{\text{half}} = \Delta t_{d1\text{前}} + 2\tau + f_{\text{前}} T/B \quad (15)$$

后置干扰频移 $f_{\text{后}}$ 为

$$\Delta t_{d2\text{后}} = \Delta t_{d1\text{后}} + \Delta t_{\text{half}} = \Delta t_{d1\text{后}} + 2\tau + f_{\text{后}} T/B \quad (16)$$

两次前置和后置干扰分布如图3所示。

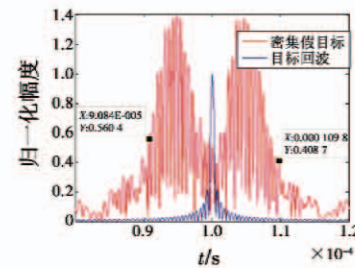


图3 两次前置和后置假目标分布

Fig.3 False target distribution of two times pre jamming and two times post jamming

由上面仿真可以看出,频移后的第二次转发与第一次转发脉压后的时间间隔为两假目标间隔的一半,

即  $f_s T/2B$ , 同样落入 CFAR 检测参考单元, 增加了假目标的密度和压制干扰总功率。

## 5 小结

本文分析了间歇采样密集假目标干扰对 CA-CFAR 检测的影响, 给出了有效干扰功率的计算方法。通过调整干扰信号相关参数使更多的更大功率假目标落入 CA-CFAR 参考单元, 增大大功率假目标的密度。其中, 采样周期与原雷达信号时宽的比值  $T_s/T$  小于且越接近 0.5, 落入参考单元的假目标数量越多, 干扰效果就越好。采样占空比  $\tau/T_s$  的取值根据参考单元的数量而定, 如果数量足够大, 则  $\tau/T_s$  越小越好, 否则  $\tau/T_s$  选取时必须考虑检测单元的假目标叠加后的幅度不能大于雷达发现目标所要求的幅度; 同时, 可增大转发次数提高干扰有效功率, 因此提出了第二次转发时参数的调节必须结合频移和时移使后一次转发的干扰与第一次相互交错的方法。但由于篇幅有限, 未能与其他方法进行比较, 在以后的研究中将进一步分析该方法的优劣。

## 参考文献

- [1] 徐晓阳, 包亚先, 周宏宇. 基于卷积调制的灵巧噪声干扰技术[J]. 现代雷达, 2007, 29(5): 28-31. (XU X Y, BAO Y X, ZHOU H Y. Technology of smart noise jamming based on convolution modulation[J]. Modern Radar, 2007, 29(5): 28-31.)
- [2] 周政, 唐宏, 张永顺. LFM 脉压雷达的随机移频干扰研究[J]. 现代防御技术, 2010, 38(1): 103-108. (ZHOU Z, TANG H, ZHANG Y S. Randomly shift frequency jamming to LFM pulse compression radar[J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(1): 103-108.)
- [3] 何芳. 基于功率准则的多假目标干扰效果分析[J]. 电光与控制, 2007, 14(6): 125-126. (HE F. Multiple false targets jamming effect analysis based on power rule[J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(6): 125-126.)
- [4] 郑光勇, 袁翔宇, 施敏良, 等. 复制叠加多假目标干扰效果仿真分析[J]. 电光与控制, 2011, 18(5): 34-36. (ZHENG G Y, YUAN X Y, SHI M L, et al. Simulation and analysis of multi-false-target jamming effect by overlapping copied radar pulses[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(5): 34-36.)
- [5] 王雪松, 肖顺平, 冯德军, 等. 现代雷达电子战系统建模与仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. (WANG X S, XIAO S P, FENG D J, et al. Modeling and simulation of modern radar and electronic warfare systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.)
- [6] 李大强, 李修和, 沈阳, 等. 一种灵巧的多假目标干扰技术研究[J]. 现代防御技术, 2010, 38(3): 108-113. (LI D Q, LI X H, SHEN Y, et al. A smart multiple false target jamming technique[J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(3): 108-113.)
- [7] 李文臣, 黄烽, 杨会民, 等. 雷达噪声干扰和多假目标干扰效能分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013(4): 403-406. (LI W C, HUANG F, YANG H M, et al. Efficiency analysis of radar noise jamming and multiple false target jamming[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2013(4): 403-406.)
- [8] 刘伟, 周怀军. 多假目标干扰对雷达检测性能影响分析[J]. 现代防御技术, 2009, 38(4): 137-142. (LIU W, ZHOU H J. Radar detection performance influenced by jamming of multi-false targets[J]. Modern Defence Technology, 2009, 38(4): 137-142.)
- [9] 杨勇, 冯德军, 肖顺平. 密集多假目标干扰对 CFAR 检测影响分析[J]. 现代防御技术, 2013, 41(1): 126-129. (YANG Y, FENG D J, XIAO S P. Impact analysis of CFAR detection for dense multiple false targets jamming[J]. Modern Defence Technology, 2013, 41(1): 126-129.)
- [10] 郑光勇, 王华兵, 谢晓波. 多假目标干扰对 CFAR 检测雷达的压制距离分析[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(2): 177-181. (ZHENG G Y, WANG H B, XIE X B. Study on the denial distance of MFT jamming against CFAR detection radars[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013, 32(2): 177-181.)
- [11] 杨英科, 李宏, 张宏伟. 雷达密集多假目标干扰及其压制性能分析[J]. 航天电子对抗, 2013, 28(5): 54-58. (YANG Y K, LI H, ZHANG H W. Radar dense multiple false targets jamming and its suppressing performance analysis[J]. Aerospace Electronics Warfare, 2013, 28(5): 54-58.)
- [12] RICHARDS M A. Fundamentals of radar signal processing[M]. New York: McGraw-Hill BookCo, 2005.

订正: 2016 年第 5 期第 26 页页脚基金项目名称应为“国家九七三计划项目”;

2016 年第 5 期第 55 页王成刚作者单位应为“中国电子科技集团公司第十研究所”。