

LFM 雷达移频干扰特征的消隐方法研究

王玉军* 朱丽莉 蒋磊
(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘要: 移频干扰是对抗 LFM 雷达的一种有效干扰方法,然而常规移频干扰的载波频偏特征可能被用来识别干扰信号,为此,该文提出一种新的干扰特征消隐方法。为了隐藏或者消除这个载波频偏,新方法将对干扰信号的脉宽进行一定的截短。此外,新方法还可以通过打乱载波频偏与干扰信号移频量的原有换算关系来破坏雷达对干扰信号的识别。和传统干扰信号相比,新方法在脉宽上将和目标回波有失配,但是这个失配损失是可以接受的。理论分析和仿真结果证明了该方法的正确性和有效性。

关键词: 线性调频; 移频干扰; 干扰识别; 脉冲压缩

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)04-0420-06

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20075

The Study on Characteristic Blanking Technique in Frequency Shifting Jamming for LFM Radar

Wang Yu-jun Zhu li-li Jiang Lei

(Institute of Information & Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Shift-frequency jamming is an effective jamming to the Linear Frequency Modulation (LFM) radar. However, the feature of carrier frequency offset of the traditional shift-frequency jamming may be used to identify the jamming signal. So a new method is proposed to hide or subtract the feature of the traditional shift-frequency jamming in this paper. For the purpose of hiding or subtracting the carrier frequency offset, the pulse width of jamming signal will be truncated with a proper magnitude. Furthermore, the new method can also disturb original conversion relationship between carrier frequency offset and the frequency shifting of the jamming signal to reduce the ability of identifying false target. Compared with the traditional shift-frequency jamming, the new method has pulse width mismatch between the jamming signal and the echo. But the loss of the mismatch is acceptable. The new method is testified with the theory analysis and simulation results.

Key words: Linear frequency-modulation; Frequency-shifting jamming; Jamming identify; Pulse compressing

1 引言

线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号是脉冲压缩雷达广泛采用的信号形式之一,具有大的时宽和带宽,通过接收时进行相干处理,解决了雷达作用距离与距离分辨率之间的矛盾,具有较强的抗干扰能力。常规的噪声干扰需要很高的干扰功率才能起到干扰效果,因此针对 LFM 雷达的干扰主要还是集中在相干干扰方法上。移频干扰是对 LFM 雷达较有效的干扰方法之一,由于 LFM 信号在距离和速度之间存在着强耦合,当信号附加一个多普勒频移时,匹配滤波器输出信号的主峰位置将发生一个偏移,或超前或滞后。因此对接收到的

LFM 信号进行移频然后再转发出去,能产生较好的干扰效果,这成为 LFM 雷达对抗研究的热点之一,并取得了一些成果^[1-5]。

然而移频干扰产生假目标的同时,相应的在匹配滤波器输出信号的中心载频上会产生一个频移,这个频移作为干扰特征被雷达方用来识别干扰信号^[6],这大大降低了移频干扰的效果。为了防止干扰特征被检测,可以减小移频量,当移频量小于雷达测频分辨率时,雷达方就无法检测到这一特征,然而这限制了移频干扰的使用范围,比如干扰机用于自卫干扰时,移频量如果不够大,则起不到拖距干扰效果甚至成为靶标。文献[7]提出了阶梯波移频、线性函数移频等改进的移频干扰方法,其主要思想是在干扰期间引进多个干扰特征或者使干扰特征产生变化,每个特征只持续很短的时间,从而造成雷达方对干扰特征的检测困难,在多假目标干扰和压制

2012-10-15 收到, 2012-12-12 改回; 2012-12-19 网络优先出版
陕西省电子信息综合集成重点实验室基金(201104Y07)资助课题
*通信作者: 王玉军 wyj029@126.com

干扰上取得较好的干扰效果。但是这些干扰方法改变了干扰样式,并未回答之前的问题,即固定移频干扰特征如何隐藏。为了找到解决办法,本文引入脉冲宽度失配的概念,在移频和脉宽截短的情况下,重新推导了干扰信号经过匹配滤波输出的数学公式,给出了输出信号中心频率的变化规律,找到了隐藏或改变移频干扰特征的方法,理论推导和计算机仿真都证明了方法的正确性。

2 移频干扰及其特征

LFM 信号的数学表达式为^[8]:

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau'}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_0 t + \frac{\mu}{2} t^2\right)\right), \quad t \leq |\tau'/2| \quad (1)$$

式中 f_0 为载波频率,脉冲宽度为 τ' , 带宽为 B , $\mu = B/\tau'$ 是调频斜率, $\text{rect}(t/\tau')$ 为矩形信号。

$$\text{rect}\left(\frac{t}{\tau'}\right) = \begin{cases} 1, & \left|\frac{t}{\tau'}\right| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & \text{elsewise} \end{cases} \quad (2)$$

设移频干扰为

$$s_j(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau'}\right) \exp(j2\pi(f_0 + \Delta f)t + j\pi\mu t^2) \quad (3)$$

式中, Δf 为固定移频量。匹配滤波器函数可以表示为

$$h(t) = s^*(-t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau'}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_0 t - \frac{\mu}{2} t^2\right)\right) \quad (4)$$

则干扰信号经匹配滤波器后的输出为

$$\begin{aligned} s_{\text{out}}(t) &= s_j(t) * h(t) \\ &= \tau' \left(1 - \frac{|t|}{\tau'}\right) \frac{\sin \pi\mu\tau' \left(t + \frac{\Delta f}{\mu}\right) \left(1 - \frac{|t|}{\tau'}\right)}{\pi\mu\tau' \left(t + \frac{\Delta f}{\mu}\right) \left(1 - \frac{|t|}{\tau'}\right)} \\ &\quad \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{2\tau'}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_0 + \frac{\Delta f}{2}\right)t\right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} s_o(t) &= s_j(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_j(t-u)h(u)du \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{u}{\tau'}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_0 u - \frac{1}{2}\mu u^2\right)\right] \text{rect}\left(\frac{t-u}{\tau'}\right) \text{rect}\left(\frac{t-u+\Delta\tau}{\tau'}\right) \\ &\quad \cdot \exp\left[j2\pi\left((f_0 + \Delta f)(t-u) + \pi\mu(t-u)^2\right)\right] du \\ &= \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \Delta f t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right] \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{u}{\tau'}\right) \text{rect}\left(\frac{t-u}{\tau'}\right) \text{rect}\left(\frac{t-u+\Delta\tau}{\tau'}\right) \exp[-j2\pi(\Delta f + \mu)t] du \\ &= \begin{cases} \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \Delta f t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right] \int_{-\tau'/2}^{t+\tau'/2} \exp[-j2\pi(\mu t + \Delta f)u] du, & -\tau' < t \leq -\Delta\tau \\ \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \Delta f t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right] \int_{t-\tau'/2+\Delta\tau}^{t+\tau'/2} \exp[-j2\pi(\mu t + \Delta f)u] du, & -\Delta\tau < t \leq 0 \\ \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \Delta f t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right] \int_{t-\tau'/2+\Delta\tau}^{\tau'/2} \exp[-j2\pi(\mu t + \Delta f)u] du, & 0 < t \leq \tau' \end{cases} \end{aligned}$$

由上式可以看出,固定移频干扰的脉冲压缩最大峰值出现在 $t_0 = -\Delta f/\mu$ 处。 $\Delta f < 0$ 时前移,当 $\Delta f > 0$ 时滞后。但是,固定移频产生一个 $-\Delta f/\mu$ 时移的同时,也使得干扰信号与目标回波的中心频率相差 $\Delta f/2$, 成为移频干扰识别的特征。

3 移频干扰特征的隐藏

对于固定移频,仅从式(5)中无法找到消隐干扰特征 $\Delta f/2$ 的途径,因此我们重新推导式(5)。假设干扰信号的脉冲宽度为 τ'_1 , 满足 $\tau'_1 = \tau' - \Delta\tau$, 表示移频干扰信号是将常规移频干扰截断一小部分,不妨假设将尾端的一小段截去,如图1所示。

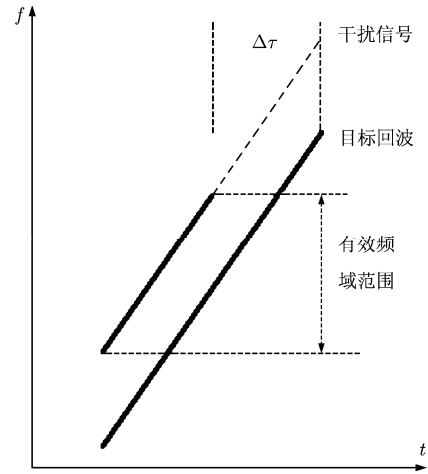


图1 脉冲截断移频干扰

此时干扰信号可以表示为

$$\begin{aligned} s_j(t) &= \text{rect}\left(\frac{t}{\tau'}\right) \text{rect}\left(\frac{t+\Delta\tau}{\tau'}\right) \\ &\quad \cdot \exp(j2\pi(f_0 + \Delta f)t + j\pi\mu t^2) \end{aligned} \quad (6)$$

则匹配滤波器输出为

$$= \begin{cases} \tau' \left(1 + \frac{t}{\tau'}\right) \frac{\sin \pi \mu \tau' \left(t + \frac{\Delta f}{\mu}\right) \left(1 + \frac{t}{\tau'}\right)}{\pi \mu \tau' \left(t + \frac{\Delta f}{\mu}\right) \left(1 + \frac{t}{\tau'}\right)} \exp \left[j 2 \pi \left(f_0 + \frac{\Delta f}{2} \right) t \right], & -\tau' < t \leq -\Delta \tau \\ \tau' \left(1 - \frac{\Delta \tau}{\tau'}\right) \frac{\sin 2 \pi \mu \tau' \left(t + \frac{\Delta f}{\mu}\right) \left(1 - \frac{\Delta \tau}{\tau'}\right)}{\pi \mu \tau' \left(t + \frac{\Delta f}{\mu}\right) \left(1 - \frac{\Delta \tau}{\tau'}\right)} \exp \left[j 2 \pi \left(\left(f_0 - \frac{\mu \Delta \tau}{2} \right) t + \frac{1}{2} \mu t^2 - \frac{1}{2} \Delta f \Delta \tau \right) \right], & -\Delta \tau < t \leq 0 \\ \tau' \left(1 - \frac{t + \Delta \tau}{\tau'}\right) \frac{\sin \pi \mu \tau' \left(t + \frac{\Delta f}{\mu}\right) \left(1 - \frac{t + \Delta \tau}{\tau'}\right)}{\pi \mu \tau' \left(t + \frac{\Delta f}{\mu}\right) \left(1 - \frac{t + \Delta \tau}{\tau'}\right)} \exp \left[j 2 \pi \left(f_0 + \frac{\Delta f}{2} - \frac{1}{2} \mu \Delta \tau \right) t - \frac{1}{2} \Delta f \Delta \tau \right], & 0 < t \leq \tau' \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 经过截短的移频干扰信号在匹配滤波器输出后需要用分段函数表示, 匹配滤波器的输出信号中心频率是分段变化的, 令 $f_1 = f_0 + \Delta f/2$, $f_2 = f_0 + \Delta f/2 - \mu \Delta \tau/2$, 则图2是匹配滤波器输出信号的瞬时频率示意图。

假设调频斜率为正斜率, 干扰移频量为 Δf , 信号在尾端截短 $\Delta \tau$, 由式(7)和图2, 得到以下重要结论:

(1) 当干扰频移为 $\mu \Delta \tau \leq \Delta f < \mu \tau'$ 时, 假目标的主峰位置 t_0 位于 $-\tau' < t_0 \leq -\Delta \tau$, 表现为前移干扰。移频干扰特征和干扰能量失配分别为 $\Delta f/2$ 和 $\tau'(1 + t/\tau')$, 与常规移频相同, 干扰特征无法消除。

(2) 当干扰频移为 $0 \leq \Delta f < \mu \Delta \tau$ 时, 假目标干扰峰的位置 t_0 位于 $-\Delta \tau < t_0 \leq 0$ 区间, 表现为前移干扰。干扰特征为 $-\mu \Delta \tau/2 - \mu t_0$, 可见在这一区间, 震荡信号是一线性调频信号, 且频率和移频量 Δf 无关, 即使雷达方准确估计出线性调频的频率信息, 也无法解算出 Δf , 达到隐藏干扰特征的目的。另外, $-\mu \Delta \tau/2 - \mu t_0 \leq \mu t_0/2 = \Delta f/2$, 移频特征始终被减小。当 $t \rightarrow -\Delta \tau/2$ 或者 $\Delta \tau \rightarrow 0$ 时, $f_0 - \mu \Delta \tau/2 - \mu t \rightarrow f_0$, 这就给我们进行特征消除提供了理论依据。在这一区间, 能量失配为 $\tau'(1 - \Delta \tau/\tau')$, 略大

于常规移频干扰。

(3) 当干扰频移为 $-\mu \tau' \leq \Delta f < 0$, 假目标主峰位置 t_0 位于 $0 < t \leq \tau'$, 表现为滞后干扰。移频干扰特征和干扰能量失配分别为 $\Delta f/2 - \mu \Delta \tau/2$ 和 $\tau'(1 - (t + \Delta \tau)/\tau')$, 虽然特征变大, 但是改变了干扰特征和移频量之间的原有换算关系, 使之解算变真实目标变得更困难, 代价是能量失配要比常规移频要大很多。

下面令 $t_0 = -\Delta f/\mu$, 当 $\Delta \tau < -t_0$ 时, 带入式(7), 得到中心频率为 $f_0 + \Delta f/2$; 当 $-t_0 < \Delta \tau < \tau' + t_0$ 时, 带入式(7), 得到中心频率为 $f_0 - \mu \Delta \tau/2 + \mu t_0 = f_0 + \Delta f - \mu \Delta \tau/2$ 。这样, 我们得到峰值中心频率随着 $\Delta \tau$ 的变化规律, 用分段函数 $f(\Delta \tau)$ 来表示。

$$f(\Delta \tau) = \begin{cases} f_0 + \frac{\Delta f}{2}, & 0 < \Delta \tau < \Delta f/\mu \\ f_0 + \Delta f - \frac{\mu \Delta \tau}{2}, & \Delta f/\mu < \Delta \tau < \tau' - \Delta f/\mu \end{cases} \quad (8)$$

图3是峰值中心频率随 $\Delta \tau$ 的变化规律示意图, 可以看出几个关键的值, 分别用 (t_1, f_1) , (t_2, f_0) 和 (t_3, f_2) 表示。其中, $t_1 = \Delta f/\mu$, $t_2 = \Delta f/\mu$, $t_3 = \tau' - \Delta f/\mu$, $f_1 = f_0 + \Delta f/2$, $f_2 = f_0 + \Delta f/2 - \mu \Delta \tau/2$ 。

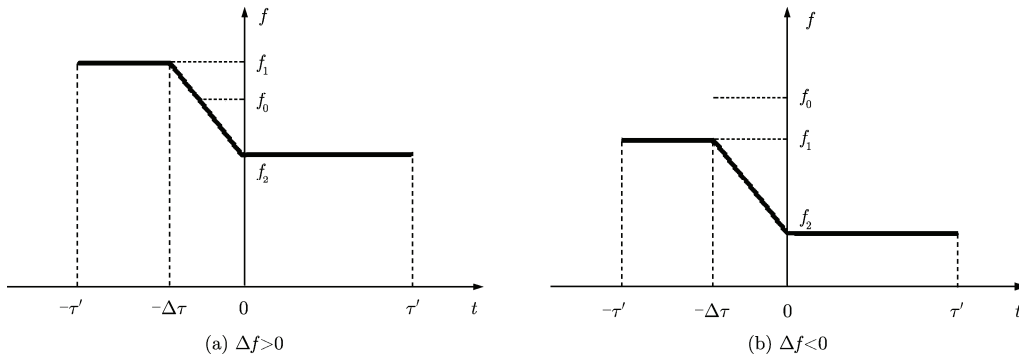


图2 干扰信号经匹配滤波器输出的瞬时频率

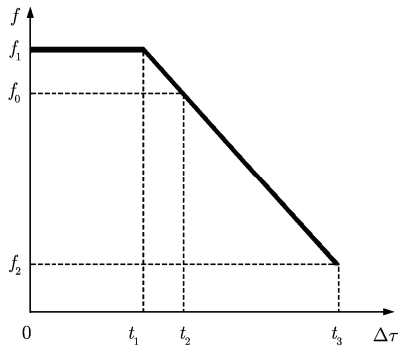


图3 干扰信号经匹配滤波器输出的中心频率随 $\Delta\tau$ 变化图

4 仿真验证

仿真内容主要是对比常规移频干扰和特征消隐干扰的匹配滤波输出波形和中心频率，观察干扰特征的消隐。雷达参数选择：载频 $f_0 = 1\text{ GHz}$ ，调频带宽 $B = 100\text{ MHz}$ ，脉冲宽度 $\tau' = 10\text{ }\mu\text{s}$ 。干扰参数见表1。

表1 干扰参数选择

干扰样式	移频量 Δf (MHz)	脉宽截短 $\Delta\tau$ (μs)	输入干信 比 (dB)
常规移频干扰	20	0	0
特征消隐干扰1	20	4	0

图4(a)是常规移频干扰和目标回波的匹配滤波输出，移频干扰产生一个前移假目标，图4(b)是常规移频匹配滤波输出的频谱，可以看到，中心频率 f_c 较 f_0 有一个 $\Delta f/2$ 的偏移，这就是常规移频干扰的特征，需要说明的是，此处频谱不是一根谱线而展宽的原因是时域数据只取了脉冲压缩后的主峰造成的。从表1可以看出，特征消隐干扰与常规移频干扰相比，只是在脉冲尾端截短一段 $\Delta\tau$ ，且满足 $\Delta\tau = 2\Delta f/\mu$ ，此时，常规移频干扰和特征消隐干扰假目标出现的位置应该相同，而特征隐藏干扰的匹配滤波器输出的中心频率还是 f_0 。图4(c)是特征消隐移频干扰的匹配滤波输出，和常规移频干扰相比，假目标位置相同，符合理论分析。图4(d)是特征消隐干扰的匹配滤波输出频谱，中心频率为 f_0 ，消除了干扰特征，使得被干扰方无法通过干扰特征反推真实目标的位置。

图5是当移频量为 -20 MHz 的情况下干扰信号匹配滤波器输出的仿真结果。其他干扰参数同表1。从图5(a)，图5(b)可以看到，常规移频干扰在目标的后面产生了一个滞后的假脉冲，且匹配滤波器的输出中心频率 f_c (990 MHz) 产生了一个 $-\Delta f/2$ 的偏移，符合常规移频干扰的结果。将移频干扰参数代入式(8)，得到匹配滤波输出中心频率应该为 970 MHz。图5(c)，图5(d)是特征消隐干扰的仿真结果，

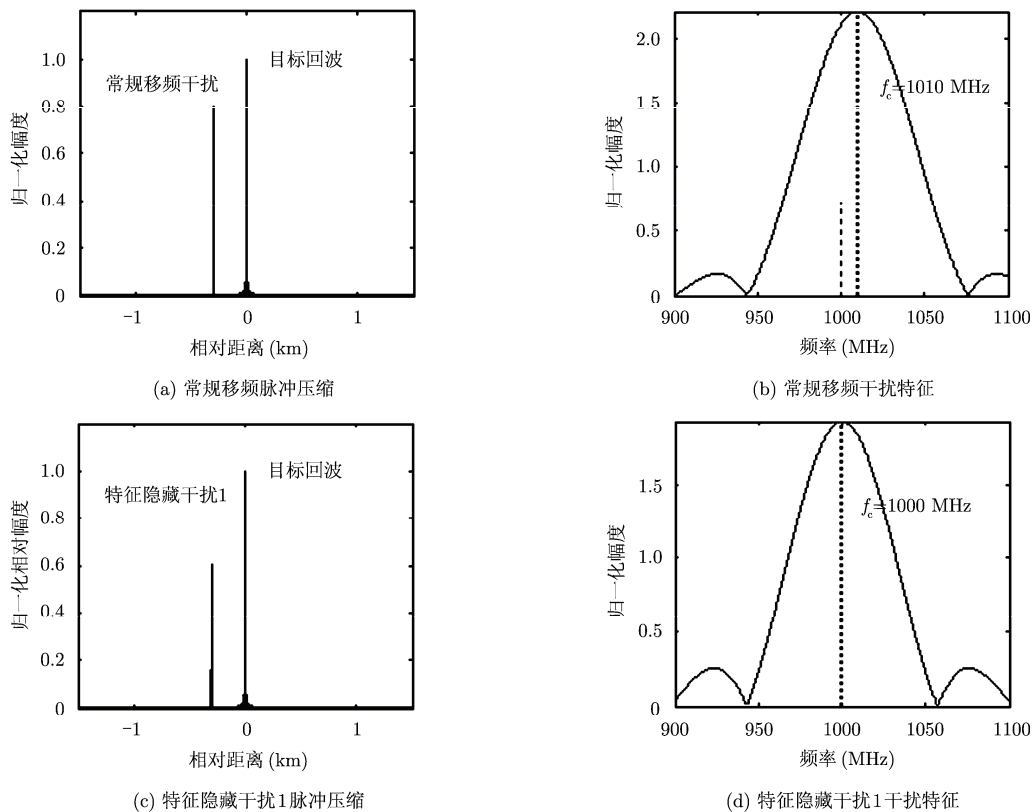
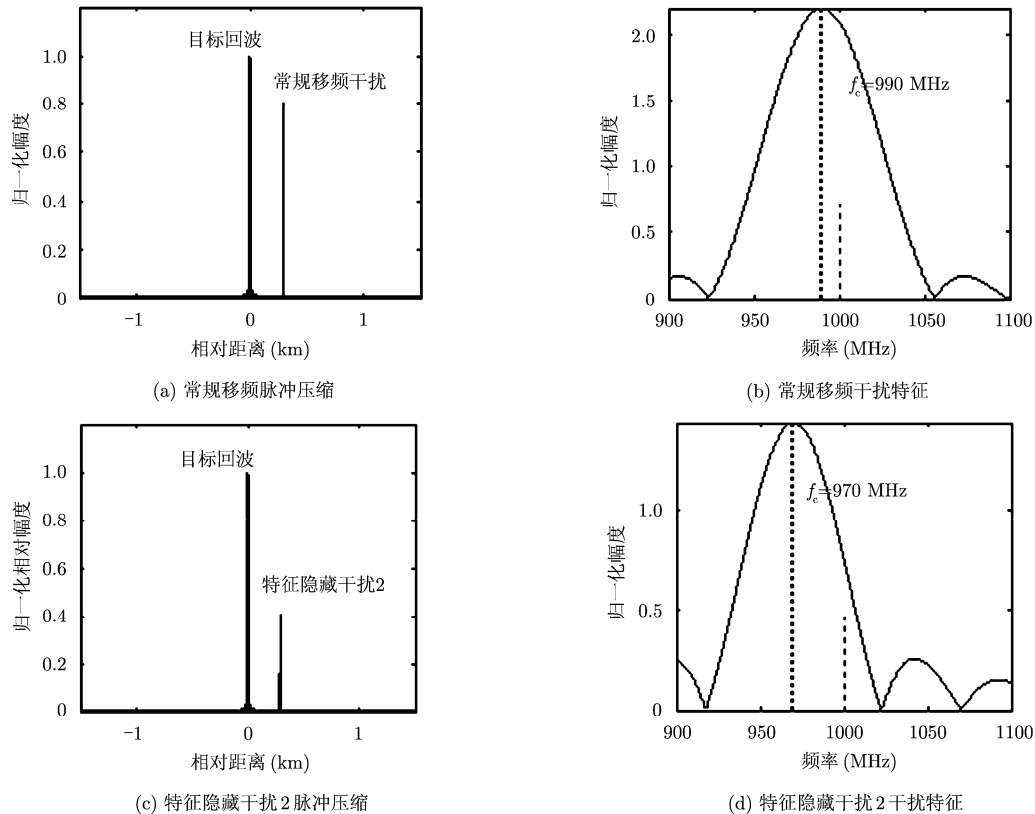


图4 $\Delta f > 0$ 时干扰仿真

图5 $\Delta f < 0$ 时干扰仿真

假目标的位置与常规移频干扰的结果相同，而频谱中心 f_c 出现在 970 MHz 处，与理论分析一致。被干扰方如果通过这个中心频率特征去反推真实目标的距离，则会得到错误的答案。

5 结论

移频干扰是对抗 LFM 雷达的一种有效干扰方法，但是移频干扰特征的存在使得干扰效果大打折扣。为了解决此问题，本文提出了一种特征消隐方法。首先推导了频率失配和脉宽失配情况下，匹配滤波的输出数学公式，找到特征消隐的途径，并给出了特征消隐干扰的几个重要结论。为了验证本文所提方法，文中进行了计算机仿真，结果证明，本文所提方法是正确有效的，并且实现简单。

参考文献

- [1] 杨绍全, 张正明. 对线性调频脉冲雷达的干扰[J]. 西安电子科技大学学报, 1991, 18(3): 24-30.
Yang Shao-quan and Zhang Zheng-ming. ECM for chirp radars[J]. *Journal of Xidian University*, 1991, 18(3): 24-30.
- [2] Fitzgerald R J. Effect of range-doppler coupling on chirp radar tracking accuracy[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, 10(43): 528-532.
- [3] 刘建成, 刘忠, 王雪松, 等. 基于群延迟的前移干扰研究[J].

自然科学进展, 2007, 17(1): 99-105.

- Liu Jian-cheng, Liu Zhong, Wang Xue-song, *et al.* Forward interference based on the group delay[J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(1): 99-105.
- [4] 吕波, 冯起, 袁乃昌. 对 LFM 脉压雷达的移频压制干扰技术研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(1): 9-12.
Lv Bo, Feng Qi, and Yuan Nai-chang. A study on frequency-shifting blanketing to LFM pulse-compression radar[J]. *Modern Radar*, 2009, 31(1): 9-12.
- [5] 毕大平, 吴少峰. 对逆合成孔径雷达的移频干扰技术研究[J]. 电子对抗, 2011, (1): 9-12.
Bi Da-ping and Wu Shao-feng. Study on the shift-frequency jamming to ISAR[J]. *Electronic Warfare*, 2011, (1): 9-12.
- [6] 刘忠, 陈登伟, 谢晓霞, 等. LFM 脉冲压缩雷达抗移频干扰的方法研究[J]. 现代雷达, 2006, 28(11): 84-86.
Liu Zhong, Chen Deng-wei, Xie Xiao-xia, *et al.* A countering technique for LFM PC radar against shift-frequency jamming[J]. *Modern Radar*, 2006, 28(11): 84-86.
- [7] 刘忠. 基于 DRFM 的线性调频脉冲压缩雷达干扰新技术[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2006: 37-39.
Liu Zhong. Jamming technique for countering LFM pulse compression radar based on Digital Radio Frequency Memory[D]. [Ph.D. dissertation], National University of

- Defense Technology, 2006: 37-39.
- [8] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 315-316.
- Ding Lu-fei and Geng Fu-lu. Radar Principle[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002: 315-316.
- [9] 朱良, 曹鹏, 禹卫东. 基于移频干扰的成像算法抗干扰性能分析[J]. 电子学报, 2011, 39(3A): 47-51.
- Zhu Liang, Cao Peng, and Yu Wei-dong. The analyse of SAR imaging algorith anti-jamming performance based on representative shift-frequency jamming[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(3A): 47-51.
- [10] 吴晓芳, 邢世其, 王雪松, 等. 对合成孔径雷达的脉间分段移频干扰[J]. 航天电子对抗, 2010, 26(1): 53-57.
- Wu Xiao-fang, Xing Shi-qi, Wang Xue-song, *et al.* Interpulse subsection-shift-frequency jamming to SAR[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2010, 26(1): 53-57.

作者简介

王玉军(1976-), 男, 山东平原, 博士, 西安电子科技大学, 讲师, 空军工程大学信息与导航学院电子对抗教研室, 研究方向为雷达对抗、电子战信号处理。

朱丽莉(1978-), 女, 讲师, 研究方向为雷达对抗、雷达隐身与反隐身。

蒋磊(1974-), 男, 副教授, 研究方向为通信对抗、电子战信号处理。