

基于正弦信号调制的灵巧干扰技术

金珊珊, 王春阳, 李欣

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

摘要 线性调频雷达在接收信号时采用脉冲压缩处理,使传统的压制式干扰在进入雷达接收机时无法获得脉冲压缩增益,从而造成干扰效果大幅下降。针对这一问题,建立了时域卷积调制的灵巧干扰信号的数学模型,根据这一模型设计了基于非完全正弦函数卷积调制的灵巧干扰信号,来实现对线性调频信号的干扰,对这一干扰信号的干扰效果进行了仿真分析。仿真结果表明:这一干扰信号可以产生假目标群来实现对一定距离单元的遮盖性干扰,并能利用脉冲压缩时旁瓣的非线性叠加覆盖真实目标回波,解决了卷积干扰信号滞后于真实目标回波的缺陷。

关键词 灵巧干扰;正弦调制;卷积调制

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.05.014

中图分类号 TN973 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)05-0062-04

A Study of Smart Noise Jamming Based on Sinusoidal Modulation

JIN Shan-shan, WANG Chun-yang, LI Xin

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Aimed at a decline in interference effect, a smart noise mathematical model is built up based on sinusoidal modulation in accordance with convolution modulation in the time domain, and then a smart noise jamming is designed based on incomplete sinusoidal convolution modulation to realize interference with linear frequency modulation signal. The result of simulation shows that the interference signals can produce false targets group to cover the real echo signals of a certain distance unit, which can also be easily covered by the nonlinear superposition sidelobe. By so doing, the defect of convolution jamming signal being behind the real target echo is overcome.

Key words: smart noise jamming; sinusoidal modulation; convolution modulation

现代新体制雷达普遍采用了抗干扰波形设计,使雷达在各种复杂杂波和人为噪声干扰的情况下,仍然具有良好的检测、识别和跟踪目标的能力,从而对干扰的有效性和可靠性提出了严峻挑战,给雷达干扰技术的研究提出了新课题。灵巧干扰技术可以根据调制函数的不同,灵活控制干扰信号的干扰效

果,由于这种干扰信号是在雷达信号基础上调制产生的,因而可以获得雷达接收机的匹配滤波增益,在同样的干扰功率下可以达到更好的干扰效果。

作为一种兼有欺骗干扰与噪声干扰特点的新式干扰样式,灵巧干扰技术自问世以来就得到了广泛而深入的研究。文献[1~2]介绍了灵巧噪声干扰的

收稿日期: 2013-11-26

基金项目: 航空科学基金资助项目(20130196001)

作者简介: 金珊珊(1989—),女,山东烟台人,硕士生,主要从事雷达及电子战新技术研究。E-mail: jinshanshan1989@163.com.

引用格式: 金珊珊,王春阳,李欣. 基于正弦信号调制的灵巧干扰技术[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(5):62-65. JIN Shanshan, WANG Chunyang, LI Xin. A study of smart noise jamming based on sinusoidal modulation[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(5): 62-65.

概念;文献[3~4]对其本质含义及相关问题进行了探讨;文献[5~7]研究并分析了对合成孔径雷达、逆合成孔径雷达的多种灵巧干扰样式,为研究脉冲体制雷达的灵巧干扰提供了参考;文献[8~10]对线性调频脉冲压缩雷达进行了卷积调制干扰;文献[11]提出了间歇采样转发式灵巧干扰信号,并分析了干扰对于线性调频脉冲压缩雷达的干扰效果;在此基础上,文献[12]对卷积调制灵巧噪声、数字多时延灵巧噪声和间歇采样转发干扰信号进行了系统的仿真分析和说明。但是,这些研究并未归纳出灵巧干扰的普遍规律,因而在干扰样式设计方面仍存在很多问题。

本文根据线性调频脉冲压缩体制雷达的信号处理特点,设计了基于非完全正弦函数卷积调制的灵巧干扰信号,讨论了这种干扰的作用机理,并仿真分析了干扰参数对干扰效果的影响。

1 灵巧干扰的模型建立

1.1 线性调频信号的模型及压缩处理

线性调频信号是现代雷达上广泛应用的一种发射信号,雷达通过发射线性调频信号一方面解决了雷达作用距离与距离分辨率的矛盾,另一方面通过接收时的脉冲压缩处理提高了雷达对抗非相干干扰的能力。

典型的线性调频信号可以表示为:

$$s_1(t) = A \operatorname{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \exp[j2\pi(f_0 t + kt^2)] \quad (1)$$

式中, $\operatorname{rect}(t/\tau)$ 为宽度为 τ 的矩形脉冲。

则上式可以表示为:

$$s_1(t) = A \exp(j2\pi f_0 t) \operatorname{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \exp(j2\pi kt^2) = A \exp(j2\pi f_0 t) s(t) \quad (2)$$

分析式(2)可以发现, $A \exp(j2\pi f_0 t)$ 仅仅是决定 $s_1(t)$ 频谱的幅度和频谱中心的位置, $s_1(t)$ 的频谱的形式是由 $s(t)$ 所决定的。 $s(t)$ 的频谱函数为:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \exp(j\pi kt^2) \exp(-j\omega t) dt = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} \exp(j2\pi kt^2) \exp(-j\omega t) dt \quad (3)$$

线性调频信号具有大的时宽带宽积,采用发射宽脉冲以提高发射的平均功率,保证有足够的探测距离,同时在接收时采用了相应的脉冲压缩方法来获得窄脉冲,以此得到高的距离分辨力,很好地解决了距离分辨力与探测距离的矛盾。

1.2 灵巧干扰的信号模型

自从1999年D.C.施莱赫提出灵巧干扰的概念以后,国内外电子对抗领域对这一问题进行了广泛的研究,通过分析已有的研究,可以发现,现有的灵巧干扰技术实质上是一种基于DRFM的信号存储与调制技术。

其工作过程为:侦察接收机接收目标雷达发射的信号,经前置放大器放大,与本振混频,通过下变频和A/D转换后,进入数字射频存储器,数字射频存储器对雷达信号进行采样和存储,而控制电路则根据分析的雷达信号的特点,产生相应的调制函数,对射频存储器存储的雷达信号进行调制,再经D/A和上变频处理,经功放和天线发射出去。

根据现有的研究,可以将时域卷积调制的灵巧干扰信号的数学模型总结为:

$$J(t) = \left[\sum_{k=1}^n f(a_k) p[t - g(t_k)] \right] \otimes s(t) \quad (4)$$

式中: $J(t)$ 为干扰信号; $s(t)$ 为雷达发射信号; $f(a_k)$ 为第 k 个采样信号的幅度系数; $g(t_k)$ 为第 k 个信号的延迟量; p 为可控的卷积调制函数。

2 基于非完全正弦函数卷积调制的灵巧干扰研究

2.1 干扰信号的形成

分析时域调制灵巧干扰模型的数学表达式可以发现,通过控制卷积调制函数的形式,可以产生新的灵巧干扰信号。现有时域卷积调制的灵巧干扰采用的调制函数为方波信号,通过控制方波信号的周期和脉冲宽度实现对干扰效果的控制,但是由于卷积之后的干扰信号经过脉冲压缩后是滞后于真实目标回波,雷达若采用前沿跟踪技术,干扰信号就无法达到预定的干扰效果。

根据时域调制的灵巧干扰信号模型,选取调制函数的参数为: $f(a_k) = 1, g(t_k) = nT, p(t) = \operatorname{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \sin[2\pi f_0 t]$, 则此种干扰信号的调制函数为:

$$sq(t) = \sum_{n=0}^N \operatorname{rect}\left(\frac{t - nT}{\tau}\right) \sin[2\pi f_0(t - nT)] \quad (5)$$

此时干扰信号可以表示为:

$$J(t) = sq(t) \otimes s(t) = \left\{ \sum_{n=0}^N \operatorname{rect}\left(\frac{t - nT}{\tau}\right) \sin[2\pi f_0(t - nT)] \right\} \otimes s(t) \quad (6)$$

设雷达发射信号为 $s(t)$, 那么最佳匹配滤波器为 $h(t) = s^*(\tau_0 - t)$, 设干扰机距雷达的距离为 R , 设目标的散射截面积为 σ , 那么目标散射对应的响应函数为: $q(t) = \sigma \delta(t - t_r)$, 其中, $t_r = 2R/c$ 。在

雷达接收机的前端,目标的回波信号 $s_r(t) = s(t) \otimes q(t)$ 。

此时,忽略外界噪声的影响,在接收机的前端,存在 2 个信号,即目标散射的回波信号 $s_r(t)$ 和灵巧干扰信号 $J(t)$,经过匹配滤波器之后,这 2 个信号的输出分别为:

$$s_o(t) = s_r(t) \otimes h(t) = s(t) \otimes h(t) \otimes q(t) \quad (7)$$

$$J_o(t) = J(t) \otimes h(t) = s(t) \otimes h(t) \otimes sq(t) \quad (8)$$

对应的频谱为:

$$S_o(\omega) = Q(\omega) |S(\omega)|^2 \quad (9)$$

$$J_o(\omega) = Sq(\omega) |S(\omega)|^2 \quad (10)$$

式中:

$$Sq(\omega) = \sum_{n=0}^N \frac{n\pi}{2} [Sa(\frac{\omega + \omega_0}{2}) - Sa(\frac{\omega - \omega_0}{2})]$$

2.2 仿真分析

仿真设定的雷达参数为:线性调频信号的起始频率为 1 000 MHz,调频带宽为 100 MHz,脉冲宽度为 100 μ s。

当采用不同的调制函数时,会有不同的干扰效果,图 1 和图 2 分别是采用不同的调制函数时,对应的干扰效果。其中,图 1 采用的正弦波频率为 50 MHz,截取 1/4 周期作为干扰调制信号;图 2 采用的正弦波频率为 75 MHz,截取 3 个周期的信号作为调制函数。

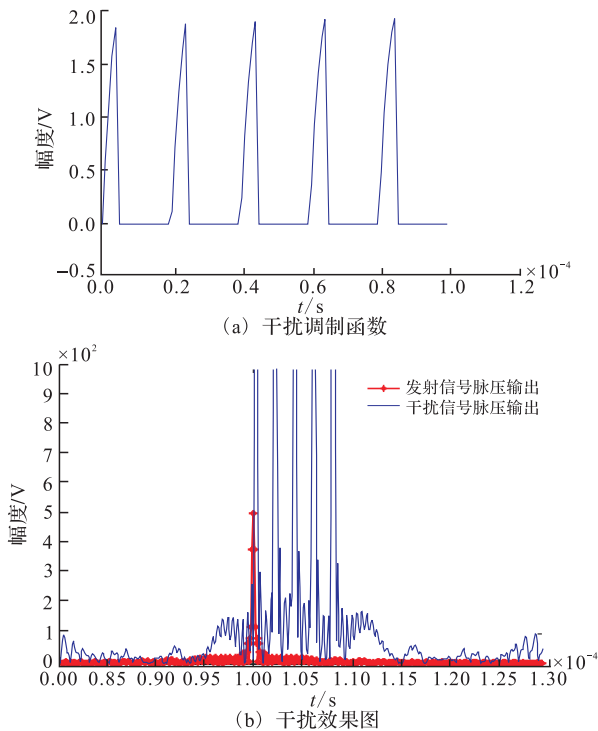


图 1 $f_0 = 50$ MHz 时调制函数及干扰效果图

Fig.1 Modulation function diagram and the interference effect of $f_0 = 50$ MHz

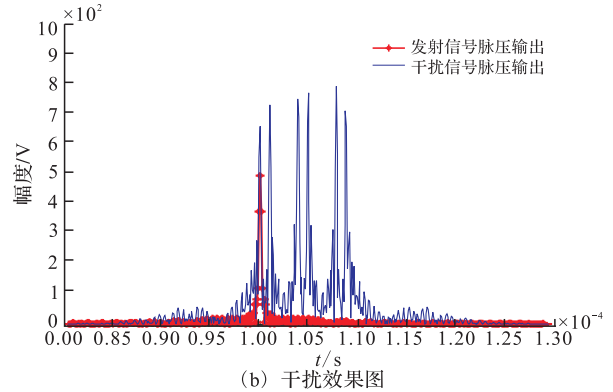
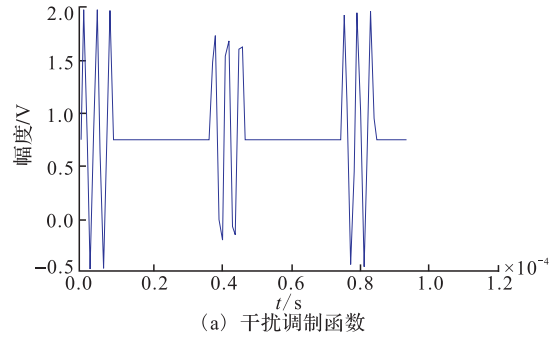


图 2 $f_0 = 75$ MHz 时调制函数及干扰效果图

Fig.2 Modulation function diagram and the interference effect of $f_0 = 75$ MHz

仿真结果分析:

1)时域干扰效果,干扰信号匹配滤波后,产生多个滞后于真实目标回波的主假目标,主假目标的数量与干扰信号的脉冲数相同,由于调制函数还附带了正弦信号,使得脉压输出的旁瓣幅度受到了非线性叠加,幅度相对于正常的脉压输出得到了大幅度提高,因而可以利用旁瓣信号压制住目标回波信号,解决了卷积调制干扰的时间滞后性。

2)随着调制信号频率的提高,产生的群假目标的数目也随之提高,而且在此种情况下,旁瓣的非线性叠加效应更为明显,使得干扰效果更为突出。

3)从干扰效果可以发现,这种干扰样式实际上对信号的频率造成了一定的改变,因而不适宜于产生假目标欺骗,而适宜于产生假目标群覆盖真实目标的干扰效果,也就是灵巧干扰中偏重于压制干扰的那一面。

3 结语

基于非完全正弦卷积调制灵巧干扰是一种针对线性调频雷达的有效干扰样式,通过控制调制函数的参数,既可产生高逼真性的假目标,又可以产生假目标群来覆盖真实回波信号。此外,这种干扰信号利用非完全正弦信号提高了线性调频信号脉压输出的旁瓣幅度,并利用旁瓣幅度覆盖了真实目标回

波,解决了卷积干扰信号滞后于真实目标回波的缺陷,仿真结果表明这种干扰信号可以有效对抗线性调频脉冲压缩雷达。

参考文献(References):

- [1] 周义建,张剑云,贺平.一种雷达干扰技术——灵巧噪声干扰[J].雷达与对抗,2002,22(1):12-16.
ZHOU Yijian, ZHANG Jianyun, HE Ping. A kind of radar jamming smart noise jamming[J]. Radar & ECM, 2002, 22(1):12-16. (in Chinese)
- [2] 文富忠.一种有效的雷达噪声干扰技术[J].电讯技术, 2003, 43(6):47-50.
WEN Fuzhong. An effective radar noise jamming technology [J]. Telecommunication engineering, 2003, 43(6):47-50. (in Chinese)
- [3] 邱杰.灵巧噪声干扰本质含义探讨[J].海军航空工程学院学报,2011,26(5):481-484.
QIU Jie. Research on essential signification of smart noise jamming[J]. Journal of naval aeronautical and astronautical university, 2011, 26(5):481-484. (in Chinese)
- [4] 邱杰,邱丽原.灵巧噪声干扰本质及相关基本问题探讨[J].现代防御技术,2012,40(3):132-136.
QIU Jie, QIU Liyuan. Essential signification of smart noise jamming[J]. Modern defense technology, 2012, 40(3):132-136. (in Chinese)
- [5] Fouts D, Pace P E, Karow C. A single-chip false radar image generator for countering wideband imaging radars [J]. IEEE solid-state circuits, 2002, 37(6):751-759.
- [6] Sun Yunhui, Chen Yongguang, Jiao Xun. On study of the responsive deception for space borne SAR [J]. ECM technology, 2004, 19(2):23-26.
- [7] Pace P, Fouts D, Ekestorm S, et al. Digital false-target image synthesizer for countering ISAR [J]. IEE proceedings radar, sonar and navigation, 2002, 149(5):248-257.
- [8] Soumekh M. SAR-ECCM using phase-perturbed LFM chirp signals and DRFM repeat jammer penalization [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2006, 42(1):191-205.
- [9] 张煜,杨绍全.对线性调频雷达的卷积干扰技术[J].电子与信息学报,2007,29(6):1408-1411.
ZHANG Yu, YANG Shaoquan. Convolution jamming technique countering LFM radar[J]. Journal of electronics & information technology, 2007, 29(6):1408-1411. (in Chinese)
- [10] 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,2007,23(5):28-31.
XU Xiaoyang, BAO Yaxian, ZHOU Hongyu. Technology of smart noise jamming based on convolution modulation[J]. Modern radar, 2007, 23(5):28-31. (in Chinese)
- [11] 王雪松,刘建成.间歇采样转发干扰的数学原理[J].中国科学,2006,36(8):891-901.
WANG Xuesong, LIU Jiancheng. Intermittent mathematical principle of sampling repeater jamming [J]. China science, 2006, 36(8):891-901. (in Chinese)
- [12] 乔安哲.灵巧噪声干扰效能仿真研究[D].西安:西安电子科技大学,2011.
QIAO Anzhe. Simulation research on smart noise jamming[D]. Xi'an: Xidian university, 2011. (in Chinese)

(编辑:田新华)