

文章编号: 2095-4980(2019)05-0871-06

对 LFM 信号的阶梯波调频干扰方法

邵 宁, 许 雄, 韩 慧, 李 蒙, 曾勇虎

(电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 介绍了一种基于阶梯波频率调制的假目标干扰方法, 分析了分段移频调制对线性调频(LFM)信号的调制原理以及干扰信号的匹配滤波处理结果。基于 LFM 信号的时频耦合特性, 理论分析表明, 对 LFM 信号进行分段并附加不同的多普勒频率调制, 可以产生多个假目标。通过仿真实验验证了所提方法的有效性和正确性, 并验证了均匀调制、非均匀调制时的干扰效果。实验结果表明该方法可以灵活实现不同幅度、不同间隔的多假目标干扰效果, 是一种行之有效的有源干扰方法。

关键词: 阶梯波; 移频调制; 干扰信号; 线性调频

中图分类号: TN97

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201905.0871

Step-wave frequency modulation jamming method against LFM signal

TAI Ning, XU Xiong, HAN Hui, LI Meng, ZENG Yonghu

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: A false target jamming method based on step-wave frequency modulation is introduced. The principle of frequency-shift based on different segmentations onto Linear Frequency Modulation(LFM) signal is analyzed and the matched filter result of the jamming signal is also discussed. According to the time-frequency coupling property of LFM signal, multiple false targets can be created after matched filter. The correctness and effectiveness of the proposed method is verified through simulations. The results of uniform modulation and non-uniform modulation are presented. The proposed method is valid and produces false targets with various amplitudes and intervals.

Keywords: step-wave; frequency-shift modulation; jamming; Linear Frequency Modulation(LFM)

线性调频(LFM)信号是雷达常用信号之一, 根据其大时宽带宽积的特性, 经过匹配滤波后, 信号可以实现距离向的高分辨特性^[1-2]。同时, 现代雷达利用波形相干实现的脉冲压缩和脉冲积累, 可以显著抑制与雷达信号不相干的干扰信号, 提高目标信号的信噪比。因此, 对 LFM 信号的干扰技术研究是电子对抗领域的研究热点。

经过近几十年的发展, 学者们提出了多种干扰方法, 一般而言, 干扰方法可以分为有源干扰和无源干扰。有源干扰指干扰机主动辐射干扰信号, 为了掩护己方目标不被对方雷达发现, 早期的干扰信号大多为大功率噪声干扰信号^[3]。真实目标的回波与大功率噪声信号一同进入雷达接收机, 只要干扰信号的幅度大于目标回波就可以达到干扰目的。该方法的数学原理较为简单, 并且在调制生成上运算复杂度不大, 得到了广泛应用。由于噪声信号不能获得雷达接收机的处理增益, 干扰方法是否有效主要取决于干扰信号的功率。

无源干扰主要是利用强反射体对雷达信号进行反射或利用新型材料改变真实目标的雷达回波^[4-5], 常用的方法包括角反射器、箔条干扰、伪装网等。文献[6]提出一种利用旋转角反射器对合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)信号形成方位向条带干扰的方法, 利用旋转物体对雷达波的多普勒频率调制效应以及在空间上进行角反射器布阵, 可以对 SAR 生成区域性遮盖式干扰。文献[7]提出一种基于相位选择表面(Phase Selective Surface, PSS)的无源干扰方法, 并分析了周期调制和非周期调制的干扰效果^[8], 该方法是一种快捷、有效的被动式干扰方法。目前, 针对相参雷达的干扰方法大多是基于存储—转发体制的, 即干扰机先侦查、接收、存储一段雷达信号, 之后在该信号基础上调制产生干扰信号后再进行发射。数字射频存储器(Digital Radio Frequency Memory, DRFM)使得该方法的实现成为可能^[9], 经过 20 多年的发展, 基于 DRFM 的转发式干扰方法仍是主要方法之一, 在此基

础上衍生出多种多样的干扰策略和干扰方法。文献[10]给出了基于 DRFM 的间歇采样调制干扰信号的数学原理以及干扰信号的匹配滤波处理结果,通过对雷达信号进行周期性的存储—发射—存储—发射,干扰信号可以在收发分时模式下产生对称分布的多个假目标。在此基础上,为进一步产生导前的假目标,可以对雷达信号进行多普勒频率调制后再进行发射,这就是针对 LFM 信号的移频调制干扰方法^[11]。雷达抗干扰技术和电子战雷达干扰技术之间的关系是相互促进、相互发展的,随着干扰手段的丰富,雷达对干扰信号的检测和抗干扰技术也在不断加强。文献[12]针对 DRFM 干扰的检测问题,提出利用目标回波和干扰回波的分布差异,基于信息论的干扰检测方法。

1 干扰信号模型

假设雷达发射 LFM 信号,不考虑载频,则其基带信号时域表达式为:

$$s(t) = \text{rect}(t/T_p) \exp(j\pi k t^2) \quad (1)$$

式中: T_p 为 LFM 信号脉冲宽度; $k = B/T_p$ 为 LFM 信号的调频率, B 为信号带宽。当 $|t| \leq T_p/2$, $\text{rect}(\cdot) = 1$, 否则 $\text{rect}(\cdot) = 0$ 。

干扰机截获雷达信号后,首先对基带雷达信号进行采样及存储,在该信号基础上调制产生的干扰信号与雷达信号之间有一定的相参性,理论上可以获得部分匹配滤波器处理增益。根据移频干扰理论(利用了 LFM 信号的时频耦合特性),对 LFM 信号附加单一频率后,调制后的信号经过匹配滤波器处理后可以生成一个在时域上偏移的假目标。然而,对 LFM 信号进行单一频率调制后的信号其频率会有部分超出匹配滤波器的带宽,从而造成假目标在幅度上有一定损失。鉴于此,本节探讨一种基于阶梯波形的多次移频调制干扰方法,尽量保证每一个移频调制量都使得新的 LFM 信号其频率范围保持在匹配滤波器带宽内。当利用阶梯波来改变 LFM 信号的时频特性时,得到的干扰信号可以写为:

$$s_j(t) = f(s(t)) \quad (2)$$

式中 $f(\cdot)$ 表示根据阶梯波形进行频率调制,具体调频值由阶梯波的幅度和调频参数决定。

图 1 为均匀阶梯波的时域波形,令其幅度变化范围为 +1 到 -1,由 N 个幅度依次减小的矩形波组成,相邻幅度之间的差值为 $2/N$ 。阶梯波的时长与 LFM 信号的脉冲宽度相等,则阶梯波各个“阶梯”的波形持续时间 T_c 可由式(3)得到。

$$T_c = T_p / N \quad (3)$$

经过频率调制后的 LFM 信号的时频特性如图 2 所示,阶梯波的变化趋势和 LFM 信号的时频变化特性是相反的。若对图 2 所示 LFM 信号其负频率部分继续叠加负移频量,调制后的信号频率就有可能超过匹配滤波器带宽,而超出部分由于在匹配滤波器带宽之外而无法获得处理增益,造成干扰能量的损失。

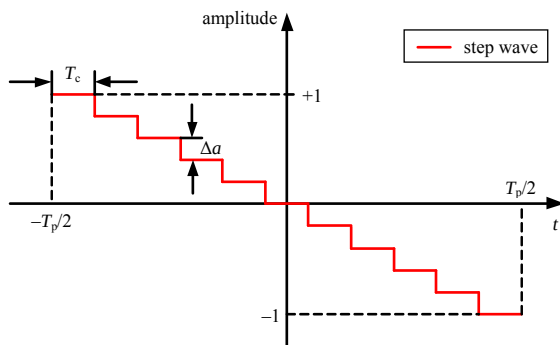


Fig.1 Uniform step-wave
图 1 均匀阶梯波时域波形

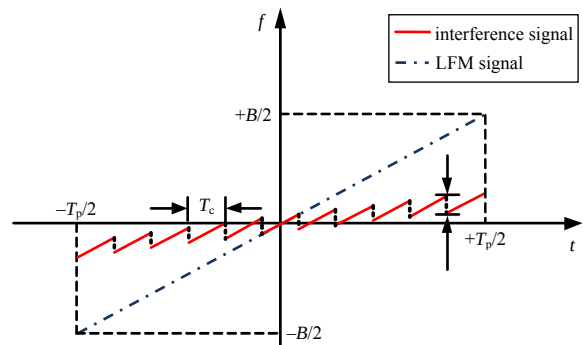


Fig.2 Time-frequency property of the jamming signal after uniform step-wave frequency modulation
图 2 均匀阶梯波频率调制后干扰信号的时频特性

相比于原 LFM 信号,经过频移调制后的干扰信号其频率随时间不再是单一线性变化。由于阶梯波形具有幅度跳变特性,调制时的移频量在不同时刻也是变化的,从而造成干扰信号的频率也是分段并且存在跳变特性。如图 2 所示,由于阶梯波的幅度变化趋势和雷达 LFM 信号的频率变化趋势相反,因此调制后干扰信号其带宽范围小于原 LFM 信号,但每一段的干扰信号其频率还是线性变化的,并且调频率与原 LFM 信号一致,但存在一定的频率偏移量。

移频后的 LFM 信号经过匹配滤波后,输出假目标的峰值位置发生改变,位移变化量 Δd 与移频量之间关系为:

$$\Delta d = \frac{c\Delta f_d}{2k} \quad (4)$$

式中: Δf_d 为移频量; c 为光速。 Δf_d 定义为阶梯波移频的最小频率间隔, 由阶梯波的幅度步进值和调频系数 k_m 决定, 因此得到相邻假目标之间的距离间隔为:

$$\Delta d_{\min} = \frac{ck_m \Delta a}{2k} \quad (5)$$

式中 $\Delta a=2/(N-1)$ 代表均匀变化阶梯波的幅度步进值。

当需要利用多个假目标来覆盖真实目标的峰值时, 相邻 2 个假目标之间的间距应该小于或接近 LFM 信号的分辨率。

$$\Delta d \leq \frac{c}{2B} \quad (6)$$

当假目标的个数 N 确定后, k_m 可以通过式(7)计算:

$$k_m \leq \frac{N}{2T_p} \quad (7)$$

同时, 假目标群在距离向的覆盖范围为:

$$\text{span} = N \frac{c\Delta f_d}{2k} \quad (8)$$

在频率不超出匹配滤波器带宽的情况下, 干扰信号产生的假目标其幅度由阶梯波的阶梯时长决定, 阶梯的时间宽度越大, 则该部分假目标的幅度越大; 反之, 假目标幅度则越小。因此可以控制阶梯波每个阶梯的时长, 让其呈现一定随机性, 就可以产生幅度起伏的假目标群。

如果要改变假目标之间的间隔, 在 k_m 不变时, 对阶梯波的幅度变化步进值进行随机控制, 从而达到随机移频的效果, 这样就可以产生等幅度的、距离上随机分布的假目标。若假目标的幅度和间距都要随机控制, 则阶梯波的台阶时长和幅度变化值都要随机变化, 这样实现起来也就相对更复杂一些。

2 仿真实验

为验证阶梯波调频干扰信号的干扰效果, 对 LFM 雷达信号产生的干扰信号其时频特性以及经过雷达匹配滤波器的处理结果进行仿真分析。假设雷达信号带宽为 20 MHz, 脉冲宽度为 48 μs , 调频率为 4.17×10^{11} , 重复频率为 1 kHz。干扰机与真目标均位于 30 km 处, 仿真中未考虑干扰信号的调制和转发延时, 该技术可以通过对雷达信号的参数进行预测及提前存储雷达信号来实现。

首先分析阶梯波时长相等(每段“阶梯”等时长)、阶梯幅度变化相同时的干扰情况。根据雷达信号的脉冲宽度生成等时长的阶梯波, 以 4 段阶梯波为例, 每个阶梯的时长为 $48/4=12 \mu\text{s}$, 幅度从 +1 减小到 -1, 递减幅度为 2/3。设定假目标间隔为 200 m, 则相应的调频系数 $k_m=8.3 \times 10^5$, 再用阶梯波调频信号和雷达信号相乘得到干扰信号, 干扰信号与雷达信号的干信比设为 6.9 dB, 其干扰效果如图 3(a)所示。

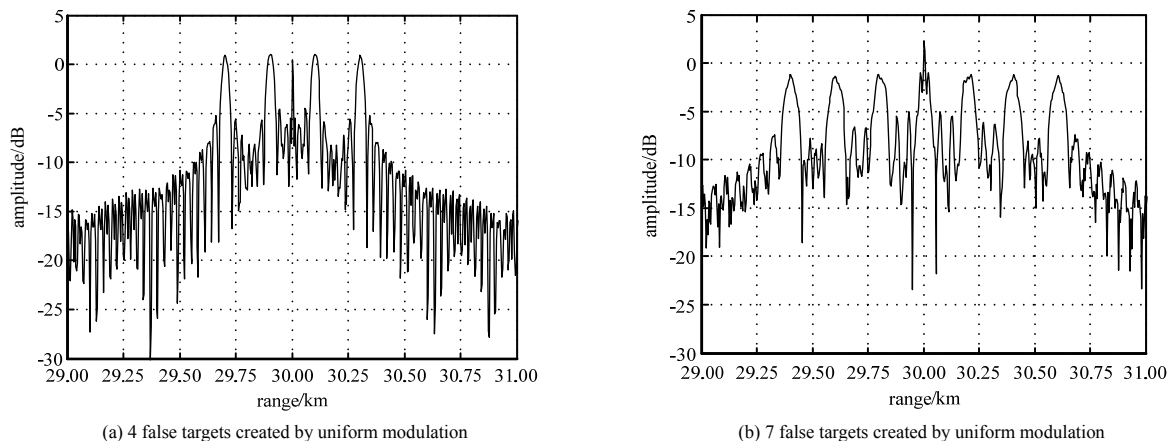


Fig.3 Jamming effect of uniform modulation

图3 阶梯波均匀调制干扰效果

由图 3(a)可见, 真目标位于 30 km 处, 在真目标周围产生了等间隔分布的 4 个假目标, 假目标之间间隔为

200 m, 与理论计算值相一致。相比于真目标, 假目标的主瓣宽度有一定展宽。图 3(b)所示为均匀阶梯波调制产生 7 个假目标的干扰效果, 可以看到, 随着假目标的数目增多, 假目标的幅度出现了下降, 并且主瓣宽度进一步展宽。与偶数个假目标不同的是, 奇数个假目标中的一个位于目标的位置, 这是由于干扰信号的时频特性决定的。图 4 所示为图 3 中干扰信号的短时傅里叶变换结果, 当阶梯波分为偶数段时, 其时频特性与原雷达信号相比并无重合部分, 因此经过匹配滤波处理后的假目标与真目标均不在一个位置。而阶梯波分为奇数段时, 0 频附近的干扰信号与 LFM 信号是一致的, 该重合部分的干扰信号会在目标位置生成一个假目标。

观察图 4 所示的干扰信号的时频特性可知, 由于阶梯波幅度的变化趋势与 LFM 信号的调频率极性是相反的, 通过合理选择 k_m , 移频调制后干扰信号其频率没有超出原 LFM 信号的部分。由于阶梯波的频率调制, 干扰信号的频率随着时间的变化不再是单纯线性的, 而是分成 4 段 LFM 信号, 每段信号的时间长度相等, 因此生成的每个假目标在幅度上是相等的。当干扰信号幅度与雷达信号相等时, 假目标的幅度应为目标幅度的 $1/N$ (N 为阶梯波的分段数)。

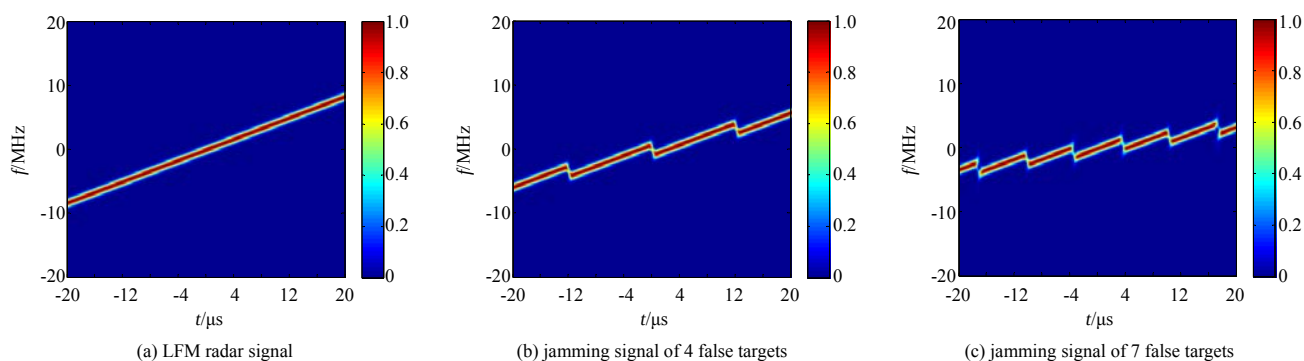


Fig.4 Time-frequency property of the jamming signal

图 4 干扰信号的时频特性

图 3 所示仿真结果为阶梯波幅度为 $+1 \sim -1$ 时的情况, 为产生更多的导前假目标, 结合 LFM 信号的时频耦合特性, 阶梯波的幅度可以适当增加, 使得干扰信号拥有更多的正频偏部分(相比于原 LFM 信号)。阶梯波按时长均为 4 段, 幅度变化范围为 $+3 \sim +1$, 调频系数分别为 $k_m = 8.3 \times 10^5$ 和 $k_m = 1.6 \times 10^6$, 其干扰效果如图 5 所示。从图中可见, 假目标均位于真目标前方, 前 3 个假目标幅度相等, 第 4 个假目标幅度略有下降。这是因为该情况下阶梯波的幅度均大于零, 因此对 LFM 信号的移频调制全是正移频量, 使得 LFM 信号正频率部分略超出匹配滤波器的带宽, 因此造成假目标的幅度下降。对比图 5(a)和图 5(b)可以发现, 假目标间隔越大, 干扰信号频率超出带宽范围越多, 造成假目标(超出部分调制而得到)幅度下降越大。

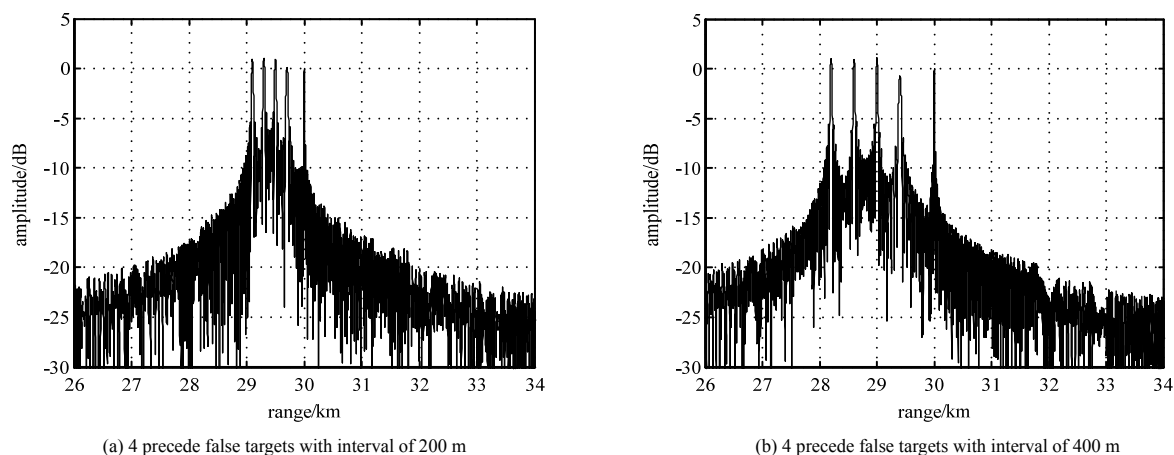


Fig.5 Jamming effects of precede false targets

图 5 导前假目标干扰效果

图 6 为非均匀调制的干扰效果, 设定阶梯波的幅度范围为 $+1 \sim -1$, $k_m = 5.8 \times 10^5$, 阶梯波分为 8 段, 每段之间的幅度变化量相等, 每段阶梯波的时间长度由随机数控制, 该情况下干扰信号的干扰效果如图 6(b)所示。从图中可见, 假目标之间的间隔相等, 但幅度差异较为明显, 幅度较大的假目标其主瓣宽度较窄, 这是因为该部分假目标对应的阶梯波时长较大, 与匹配滤波器重合的部分越多。当阶梯波时长较小时, 产生的假目标幅度非常小, 因

此在设计时为保证假目标的幅度, 应该避免这种情况。

图 6(c)和图 6(d)是阶梯波幅度变化不均匀时的干扰效果, 利用随机数来控制阶梯波之间的幅度变化, 使得阶梯波在+1~-1 范围内幅度变化量不一致。由于移频调制量并没有超出匹配滤波器的带宽范围, 并且每段阶梯波的时长是一样的, 因此产生的假目标幅度是相等的。由于每段阶梯波对应的移频量及移频量之间的差值并不相等, 造成假目标之间的距离间隔也是不等的, 间隔之间呈现一定的随机性。

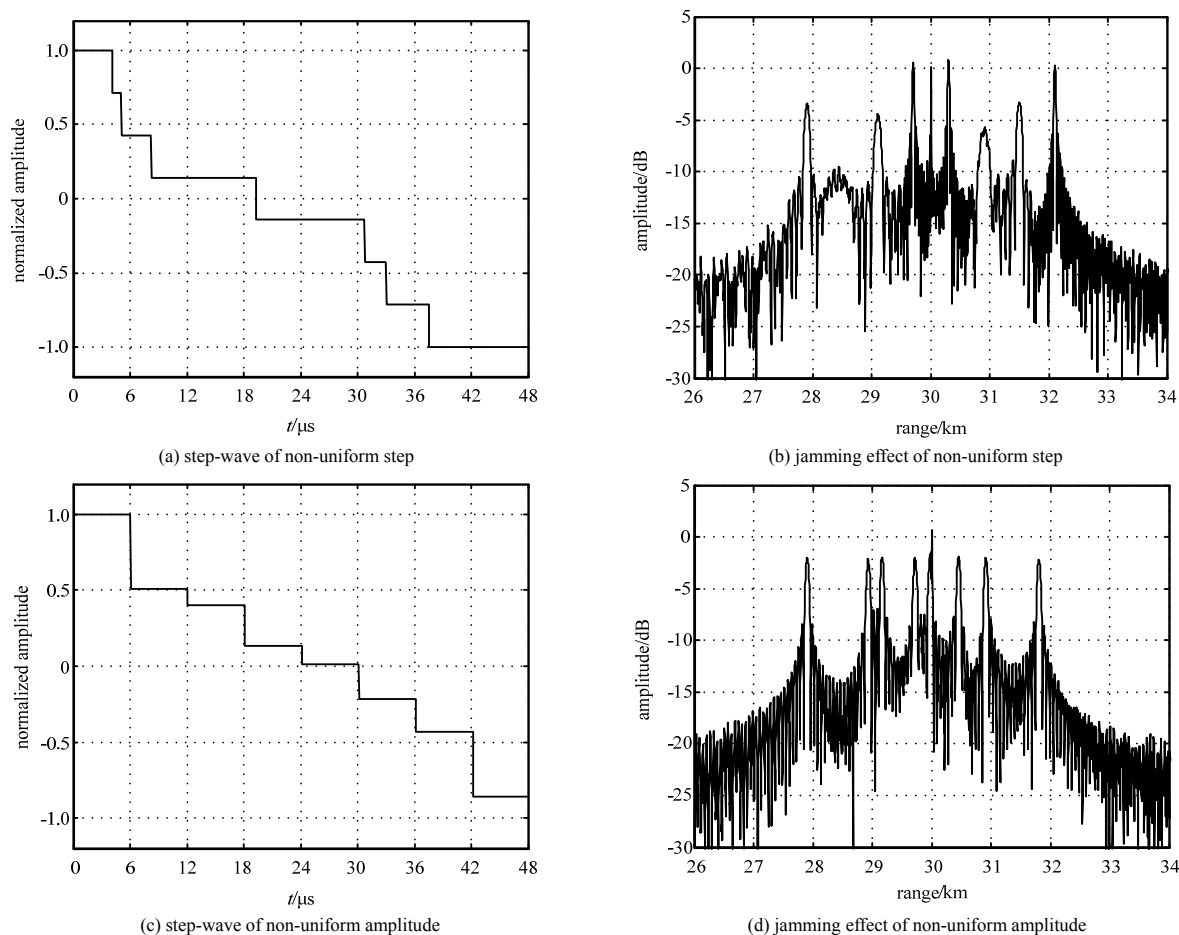


Fig.6 Jamming effects of non-uniform modulation

图 6 非均匀调制阶梯波干扰效果

3 结论

本文针对 LFM 雷达信号, 提出利用阶梯波对雷达信号进行移频调制的干扰方法, 推导了干扰信号经过雷达匹配滤波器的输出结果。结合 LFM 信号的时频耦合特性, 理论分析出该方法可以产生多个假目标干扰信号, 假目标的幅度和个数取决于阶梯波的幅度特性及调频系数的大小。通过仿真实验验证了理论分析的正确性, 并分析讨论了阶梯波均匀调制、非均匀调制的干扰效果, 并分别给出了不同参数下假目标干扰效果和遮盖式干扰效果。该方法可以针对 LFM 信号生成个数可控、间隔可控、幅度起伏的假目标, 为干扰信号的设计及应用提供一种借鉴思路。

参考文献:

- [1] 王玉军,赵国庆,王宏伟. 一种 LFM 雷达回波对消干扰算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2008,35(6):1031-1035. (WANG Yujun,ZHAO Guoqing,WANG Hongwei. Echo cancelling algorithm for the LFM radar[J]. Journal of Xidian University, 2008,35(6):1031-1035.)
- [2] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 2 版. 西安:西安电子科技大学出版社, 2012. (ZHAO Guoqing. Principle of radar countermeasure[M]. 2nd ed. Xi'an,China:Xidian University Press, 2012.)
- [3] GONG Shixian,WEI Xizhang,LI Xiang,et al. Mathematic principle of active jamming against wideband LFM radar[J]. Journal

- of Systems Engineering and Electronics, 2015,26(1):50–60.
- [4] WU Xianli, SHEN Qi, LONG Teng. Chaff jamming effect to radar and math model building[C]// 2006 CIE International Conference on Radar. Shanghai, China: IEEE, 2006:1–5.
- [5] 徐乐涛. 基于间歇采样转发的宽带雷达相干干扰研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012. (XU Letao. Research on wideband radar coherent jamming based on intermittent-sampling repeater jamming[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2012.)
- [6] 白雪茹, 孙广才, 周峰, 等. 基于旋转角反射器的 ISAR 干扰新方法[J]. 电波科学学报, 2008,23(5):867–872. (BAI Xueru, SUN Guangcai, ZHOU Feng, et al. A novel ISAR jamming method based on rotating angular reflectors[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008,23(5):867–872.)
- [7] XU Letao, FENG Dejun, WANG Xuesong. Improved synthetic aperture radar micro-Doppler jamming method based on phase-switched screen[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2015,10(13):525–534.
- [8] XU Letao, FENG Dejun, ZHANG Ran, et al. High-resolution range profile deception method based on phase-switched screen[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016(15):1665–1668.
- [9] 冯德军, 徐乐涛, 王雪松. 间歇采样转发假目标的相位特性及其在角度欺骗干扰中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2014,36(3):135–140. (FENG Dejun, XU Letao, WANG Xuesong. Phase signature of active decoy and its application in angular deception jamming using interrupted-sampling repeater[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014,36(3):135–140.)
- [10] WANG Xuesong, LIU Jiancheng, ZHANG Wenming, et al. Mathematic principles of Interrupted-Sampling Repeater Jamming (ISRJ)[J]. Science in China Information Sciences, 2007,50(1):113–123.
- [11] 顾成虎, 曲丽娜. LFM 脉冲压缩雷达的移频干扰技术研究[J]. 哈尔滨商业大学学报, 2015,31(3):350–353. (GU Chenghu, QU Lina. Study on frequency-shifting jamming to LFM pulse compression radar[J]. Journal of Harbin University of Commerce, 2015,31(3):350–353.)
- [12] 曹兰英, 罗美方, 吴健. 基于信息论的脉冲压缩雷达 DRFM 干扰检测技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(3):431–435. (CAO Lanying, LUO Meifang, WU Jian. Detection of DRFM jamming for pulse compression radar based on information theory[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(3):431–435.)

作者简介:



郇 宁(1989–), 男, 西安市人, 博士, 工程师, 主要研究方向为信号处理技术、复杂电磁环境特性与模拟、雷达干扰技术。email: 358041578@qq.com.

李 蒙(1992–), 男, 山东省无棣县人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为机器学习。

许 雄(1985–), 男, 福建省莆田市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为雷达对抗试验技术, 复杂电磁环境特性与模拟, 复杂电磁环境效应。

韩 慧(1980–), 女, 成都市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为复杂电磁环境特性与模拟。

曾勇虎(1972–), 男, 江西省赣州市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为复杂电磁环境效应。