

## 脉冲多普勒引信的速度多假目标干扰

隋 鉴, 李国林, 尹洪伟  
(海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 脉冲多普勒引信具有距离和速度二维选择能力,使其具有很强的抗干扰能力。为了提高对脉冲多普勒引信的干扰效果,在分析其基本工作原理的基础上,提出了基于多普勒调制的速度多假目标干扰。给出了产生速度多假目标的基本原理,推导了速度多假目标干扰下脉冲多普勒引信的输出,并对速度多假目标干扰的干扰效果进行仿真分析。理论分析和仿真结果表明该方法能够在速度维对脉冲多普勒引信形成多假目标干扰,且假目标的数量和参数能够根据干扰需要进行灵活控制,能够有效干扰脉冲多普勒引信。

**关键词:** 引信; 目标探测; 脉冲多普勒; 多假目标干扰

**中图分类号:** TN972      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2015)10-0007-03

## Multiple Velocity False Targets Jamming Against Pulse Doppler Fuze

SUI Jian, LI Guo-lin, YIN Hong-wei  
(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Pulse Doppler fuze has the ability of distance and velocity measurement, which make it have strong anti-jamming capability. In order to improve the jamming effect to the pulse Doppler fuze, a multiple velocity false targets jamming method based on Doppler modulation was designed based on analysis to its working principle. The working principle of multiple velocity targets generating was proposed, then the output of pulse Doppler fuze under the jamming of multiple velocity false targets was derived. Simulations were made to analyze the jamming effect of multiple velocity false targets. Theoretical analysis and simulation results demonstrate that this jamming signal can produce multiple false targets with different velocities and the jamming parameters can be altered flexibly according to the requirement. It is proved that this method can jam the pulse Doppler fuze efficiently.

**Key words:** fuze; target detection; pulse-Doppler; multiple false targets jamming

### 0 引言

为了在现代战争中实现对目标的精确探测识别和高效毁伤,要求引信信号处理能够充分利用弹目交会信息提高引信的抗干扰能力并具有高速、灵活的信号处理能力<sup>[1-3]</sup>。作为此类引信代表的脉冲多普勒引信<sup>[4]</sup>兼具测距和测速能力,能够为引战配合提供更多的弹目交会信息,具有更好抗干扰能力和引战配合效率。脉冲多普勒引信的相干处理使得噪声干扰难以获得相干处理增益,导致噪声干扰的干扰效果较差<sup>[5]</sup>,脉

冲多普勒引信的距离和速度二维选择能力,使得欺骗干扰在转发时间和频率上必须非常精确<sup>[6]</sup>。其优良的性能使其在各种精确制导武器中得到广泛应用,对各类突防目标构成极大威胁<sup>[7-8]</sup>。

为了提高对脉冲多普勒引信的干扰效率,本文提出了基于多普勒调制的速度多假目标的干扰方法,并对该方法的干扰效果进行理论分析和仿真验证。

### 1 脉冲多普勒引信基本工作原理

脉冲多普勒引信是应用多普勒效应工作的一种脉冲体制引信,它具有脉冲引信和连续波多普勒引信两种体制的优点,同时克服了它们各自的缺点<sup>[9]</sup>。其工作过程为,目标反射回来的回波信号由天线接收后输入混频器,与基准信号进行混频,混频后的信号经视频

收稿日期:2014-11-20      修回日期:2014-12-10

基金项目:国家自然科学基金(61372027)

作者简介:隋 鉴(1983—),男,山东龙口人,博士生,助工,研究方向为电子对抗。

放大后,通过距离选通电路对回波信号进行距离选择,经距离选择的有用信号经多普勒信号处理电路提取多普勒信号,以对回波信号进行速度选择,当回波满足设计要求时便通过执行级输出起爆信号。

## 2 多普勒调制的速度多假目标干扰原理

脉冲多普勒引信通常采用多普勒滤波器组提取回波信号的多普勒频率<sup>[10]</sup>,因此,针对具有速度选择能力的脉冲多普勒引信,可以采用速度欺骗对其进行干扰,从而造成脉冲多普勒引信“早炸”或起爆不适,降低导弹武器系统对目标的杀伤效果,实现目标的突防。针对干扰机无法准确获得脉冲多普勒引信的速度选择范围等引信自身参数这种情况,本文提出了一种基于多普勒调制的速度多假目标干扰,其基本工作原理如图1所示。

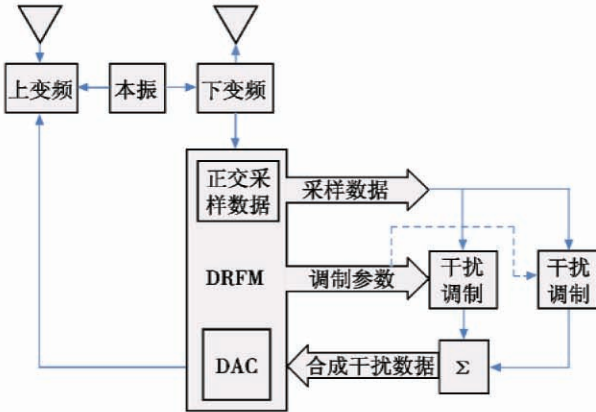


图1 速度多假目标干扰原理框图

Fig.1 Block diagram of multiple velocity false targets jamming

该方法以DRFM的存储转发<sup>[11-13]</sup>为基础,利用DRFM存储信号可以保持信号的相干性,可以对DRFM存储的引信信号进行相应的多普勒调制,然后将多普勒调制的干扰信号叠加并经适当的延时后,经DA变换并上变频后进行转发,从而产生速度多假目标干扰信号。速度多假目标干扰可以使干扰覆盖脉冲多普勒引信可能工作的速度范围,提高突破脉冲多普勒引信速度选择的效率,以提高干扰效率。

假设脉冲多普勒引信的发射信号为

$$s_i(t) = A_0 \text{rect}\left(\frac{t}{\tau_p}\right) \exp(j\bar{\omega}_0 t) \quad (1)$$

式中: $A_0$ 为发射信号幅度; $\bar{\omega}_0$ 为载波角频率; $\tau_p$ 为发射脉冲宽度; $\text{rect}\left(\frac{t}{\tau_p}\right) = \begin{cases} 1 & nT_r \leq t \leq nT_r + \tau_p, n=0,1,2,\dots \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$ , $T_r$ 为脉冲重复。

脉冲多普勒引信接收的速度多假目标干扰信号

可以表示为: $\sum_{i=0}^{N-1} A_i s(t - \tau - t_j) \exp[j(\bar{\omega}_d + \bar{\omega}_{di})t]$ 。其中:

$A_i$ 为干扰信号的幅度调制; $\tau = \frac{2R_i}{c}$ 为干扰信号回波的固有延时; $t_j$ 为干扰机引入的延时; $\bar{\omega}_{di}$ 为干扰附加的多普勒调制量; $N$ 为假目标数量。

引信接收的干扰信号,经过相干解调处理后的输出信号为

$$\sum_{i=0}^{N-1} \left\{ A_i A_i \text{rect}\left(\frac{t - \tau - t_j}{\tau_p}\right) \exp[-j\bar{\omega}_0(\tau + t_j)] \cdot \exp[j(\bar{\omega}_d + \bar{\omega}_{di})t] \right\} = \sum_{i=0}^{N-1} A_i A_i \text{rect}\left(\frac{t - \tau - t_j}{\tau_p}\right) \exp[j(\bar{\omega}_d + \bar{\omega}_{di})t + \varphi_j] \quad (2)$$

式中, $\varphi_j$ 为延时引入的固定相位,对引信提取多普勒信号没有影响。

通常引信干扰机可以通过对干扰信号的延时 $t_j$ 进行控制,以保证干扰信号进入引信距离选通门。假设干扰信号能够进入引信距离选通门,由式(2)可以看出,经相干解调后的输出为多个多普勒信号的叠加,当脉冲多普勒引信采用多普勒滤波器组进行处理时,会在多个滤波器中输出有效的多普勒信号,从而形成速度多假目标干扰。

## 3 仿真分析

本文设计了仿真实验对速度多假目标干扰的干扰效果进行仿真分析。假设被干扰的脉冲多普勒引信的基本参数为:脉冲宽度为20 ns,脉冲重复频率为1000 ns,中心频率为2 GHz,假目标的多普勒调制范围为10~100 kHz,假目标数量为10。

干扰信号被引信接收后经相干解调,信号的时域和频域波形如图2所示。从图2中可以看出,干扰信号相干解调后的输出信号为不同多普勒信号的叠加,在频域形成频谱展宽的效果,可以在多普勒滤波器中形成多个输出。

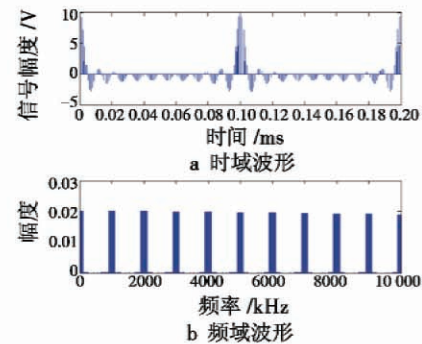


图2 干扰信号经相干解调后的输出波形

Fig.2 Outputs of jamming signal after coherent demodulation

相干解调后的输出信号,经过引信的距离选通和多普勒滤波器组滤波处理后,输出的距离延时-多普勒频率二维谱如图3所示。图4给出了同一距离单元



内干扰信号经多普勒滤波器组输出的多普勒谱。由仿真结果可以看出,干扰信号在同一距离上形成了多个速度假目标,假目标的数量和多普勒频率范围同干扰参数设置一致。基于多普勒调制的多假目标干扰可以提高干扰信号突破脉冲多普勒引信速度选择的效率,能够对脉冲多普勒引信形成欺骗干扰,造成引信“早炸”,或者破坏引信测得的速度值,使得引信起爆不适时,降低引战配合效率。

上述仿真中,干扰信号形成的假目标在幅度和假目标间隔上保持固定,引信有可能采用一定的抗干扰措施对这种假目标进行抑制,使干扰效果降低甚至失效。为了提高干扰效果,可以采用随机多普勒调制使假目标幅度和间隔随机分布,形成随机起伏的多假目标干扰,其产生的干扰效果如图 5 所示。可见,当假目标数量足够密集,随机多普勒调制干扰还能对脉冲多普勒引信形成压制干扰效果。

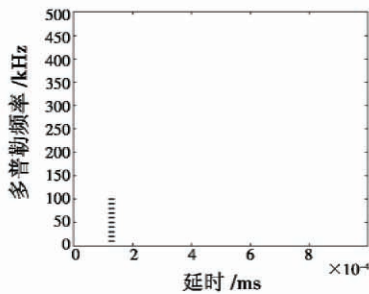


图 3 干扰信号作用下的距离延时-多普勒二维谱

Fig.3 Time delay-Doppler spectrum with jamming signal

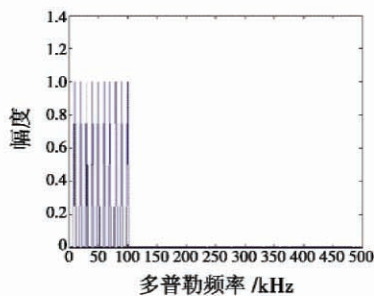


图 4 同一距离单元内的多普勒滤波结果

Fig.4 Output of Doppler filtering in the same range cell

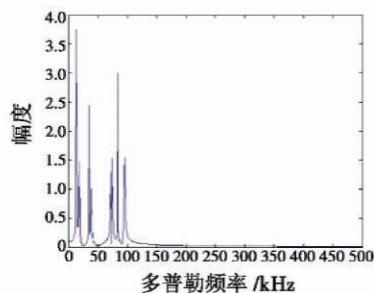


图 5 随机多普勒调制速度多假目标干扰

Fig.5 Random Doppler frequency modulated multiple velocity targets jamming

## 4 结束语

针对脉冲多普勒引信的速度选择能力,本文提出了基于多普勒调制的速度多假目标干扰。理论分析和仿真结果表明,该方法可以在速度维对脉冲多普勒引信形成多假目标干扰,多假目标能够提高干扰突破引信速度选择的效率,且假目标的数量和参数可以根据需要灵活控制,以形成不同的干扰效果。基于多普勒调制的速度多假目标干扰能有效干扰脉冲多普勒引信,具有很强的实用性。

## 参考文献

- [1] 陈永光. 从雷达电子战看现代战场电磁博弈[J]. 电光与控制, 2014, 21(6): 1-8. (CHEN Y G. Electromagnetic gambling in modern battlefield viewed from radar EW [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(6): 1-8.)
- [2] 袁正, 李元级. 现代空空导弹引信技术[J]. 航空兵器, 2000(2): 11-15. (YUAN Z, LI Y J. Modern air-to-air missile fuze technology [J]. Aero Weaponry, 2000(2): 11-15.)
- [3] 周军伟, 刘斌. 基于 SOPC 技术的脉冲多普勒引信信号处理器设计[J]. 火箭与制导学报, 2013, 33(2): 64-66. (ZHOU J W, LIU B. The design of pulse Doppler fuze signal processor based on SOPC technique [J]. Journal of Projectiles Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(2): 64-66.)
- [4] LI X J, LI J, LI T. The fuze Doppler echo algorithm of near-field electro-magnetic scattering model [C]//Antennas, Propagation & EM Theory (ISAPE), 10th International Symposium, 2012: 1107-1111.
- [5] 周新刚, 赵惠昌, 涂友超. 脉冲多普勒引信抗干扰性能评判方法和仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(1): 207-211. (ZHOU X G, ZHAO H C, TU Y C. ECCM evaluation and simulation of pulse Doppler fuze [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(1): 207-211.)
- [6] SCHLEHER D C. Electronic warfare in the information age [M]. Boston: Artech House, 1999.
- [7] 廖辉荣, 李国林, 李涛. 机载电子战系统对引信信号侦察可行性分析[J]. 电光与控制, 2011, 18(5): 42-44. (LIAO H R, LI G L, LI T. Feasibility of fuze signal detection by airborne self-defense electronic warfare system [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(5): 42-44.)
- [8] 裴云. 自卫电子对抗系统对战斗机作战效能的影响分析[J]. 电光与控制, 2006, 13(3): 19-22. (PEI Y. Analysis of the self-defense ECM system to fighter airplane's operational effectiveness [J]. Electronics Optics & Control, 2006, 13(3): 19-22.)

## 5 结 论

本文利用阵列输出数据的四阶累积量矩阵构建了稀疏表示模型,在高斯白噪声以及色噪声背景下,该模型均能够抑制噪声项,由此利用二阶锥规划对模型求解时不需要选取平衡残差与结果稀疏性的正则化参数;四阶累积量矩阵的构造使得阵列中产生虚拟阵元,因此本文算法能够分辨的最大信源数大于实际阵元数;仿真表明本文算法具有较高的角度分辨力,在角度间隔  $\Delta\theta \geq 2^\circ$  时,能够成功分辨两信源。存在的不足是低信噪比时,算法性能受快拍数影响较大,少量的快拍数会增大估计误差,随着快拍数的增多,误差逐渐减小;本文构建的稀疏表示模型仅适用于非相关信号,因此算法不具备解相干能力。

### 参 考 文 献

- [1] CHEN S S, DONOHO D L, SAUNDERS M A. Atomic decomposition by basis pursuit [J]. SIAM Review, 2001, 43 (1): 129-159.
- [2] GORODNITSKY I F, RAO B D. Sparse signal reconstruction from limited data using FOCUSS: a reweighted minimum norm algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45 (3): 600-616.
- [3] HYDER M M, MAHATA K. Direction of arrival estimation using a mixed  $l_{2,0}$  norm approximation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58 (9): 4646-4655.
- [4] PANAH I A, VIBERG M. Fast LASSO based DOA tracking [C]//The 4th IEEE International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing, 2011: 397-400.
- [5] MALIOUTOV D, CETIN M, WILLSKY A S. A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53 (8): 3010-3022.
- [6] STOICA P, BABU P, LI J. SPICE: a sparse covariance-based estimation method for array processing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59 (2): 629-638.
- [7] YIN J H, CHEN T Q. Direction-of-arrival estimation using a sparse representation of array covariance vectors [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59 (9): 4489-4494.
- [8] BOAZ P, BENJAMIN F. Direction finding algorithms based on high-order statistics [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1991, 39 (9): 2016-2024.
- [9] JIANG B, ZHENG L J, CHENG Q L. Fourth-order music algorithm based on minimum redundant virtual extended array [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 42 (6): 517-600.
- [10] STEPHEN B, LIEVEN V. 凸优化 [M]. 王书宁, 许肇, 黄晓霖, 译. 北京: 清华大学出版社, 2013: 149-153. (STEPHEN B, LIEVEN V. Convex optimization [M]. Translated by WANG S N, XU J, HUANG X L. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 149-153.)
- [11] ZHENG C D, LI G, LIU Y M, et al. Subspace weighted  $l_{2,1}$  minimization for sparse signal recovery [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2012, 98 (1): 1-11.
- [12] 胡南. 基于稀疏重构的阵列信号波达方向估计算法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013. (HU N. Direction of arrival estimation algorithms for array signal based on sparse signal reconstruction [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.)
- (上接第 9 页)
- [9] 赵惠昌. 无线电引信设计原理与方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012. (ZHAO H C. Fundamentals and methodology of radio fuze [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.)
- [10] CHARKRAVARTI M, CHANDA V B, BAND J J, et al. An effective estimation of time-dependent Doppler frequency for weapon fuzing [C]//TENCON 2008-IEEE Region 10 Conference, 2008: 1-4.
- [11] 王鑫, 吴华, 程嗣怡, 等. 分时体制多目标干扰系统干扰资源综合管控 [J]. 电光与控制, 2014, 21 (4): 20-25. (WANG X, WU H, CHENG S Y, et al. Integrated management of jamming resources in time-sharing and multi-target interference systems [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21 (4): 20-25.)
- [12] WATSON C J. A comparison of DDS and DRFM in the generation of "smart noise" jamming waveform [D]. Monterey: Naval postgraduate school, 1997.
- [13] 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.)