

# 地杂波引起的引信早炸问题研究

吴建峰, 何广军, 雷虎民

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:**由于雷达引信载体运动的高速性,引信工作的近程性,使得引信在低空作战时,地杂波信号极易诱使引信早炸。为解决这一问题,通过建立基于网格映象法的地杂波回波信号的仿真模型,分析了引信地杂波信号特性,提出利用经验判据对回波信号进行频率识别以及对回波信号进行窄带滤波等途径来克服地杂波导致的引信早炸问题。研究结果为日后进一步提高引信抗干扰性能提供了技术依据。

**关键词:**PD 引信;地杂波;早炸

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2010.02.010

**中图分类号:** TN957.51;TP391.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2010)02-0042-05

防空导弹攻击低空或掠地飞行的目标时,地杂波信号将对引信产生较为严重的干扰作用。由于地杂波信号是发射信号的无用反射信号,同时它与目标信号有许多相似之处,当杂波信号频率落入引信信号处理通带,且信号足够强时,将会引起引信早炸。近年来,地空导弹频繁出现早炸问题,直接影响到武器型号的设计定型和部队战斗力的生成,已成为目前迫切需要解决的问题<sup>[1]</sup>。

杂波本身的复杂性使得杂波谱的定量计算和仿真一直存在难点。针对杂波的建模和仿真主要有 2 种思路,一种是从时域理解杂波,另一种则是从频域上理解杂波,而在地杂波研究中,更倾向于第二种思路。地杂波波形呈现很大的随机性,但其功率谱在各参数不变的情况下,却呈现出相对稳定的特点<sup>[1-2]</sup>。因此,地杂波仿真的一般思路是:① 计算得到地杂波功率谱;② 根据功率谱得到时域随机序列。文中利用文献[3]所提出的计算方法来计算仿真地杂波回波信号,分析地杂波信号对雷达引信的影响,进而提出克服地杂波引起的引信早炸问题的技术途径。

## 1 地杂波点散射体回波信号分析

对于防空导弹雷达引信波束照射的地面区域的杂波回波信号,本文采用经典的网格映象法<sup>[4-5]</sup>进行模拟。通过网格映象法,地杂波平面被划分为一个个点散射体,要计算出每一个点散射体的回波信号,必须要确定它们的幅度、相位和多普勒频移。点散射体的相位一般假设在 $[-\pi, \pi]$ 内均匀分布,多普勒频率根据雷达参数和网格单元的位置关系可以算出来,而所有点散射体的幅度值,按照照射区域内地形、地貌的不同,可选瑞利分布、对数正态分布。防空导弹雷达引信一般属于低分辨率雷达,因此,文中选择地杂波的幅度分布为瑞利分布,频谱分布为高斯分布。

假设在雷达引信波束照射区域有一点散射体,它偏离引信天线主波束角度为 $\theta$ ,与引信的距离为 $R$ 。根据近炸引信的雷达方程<sup>[6]</sup>,可得雷达引信方程瞬时功率为:

$$P_R(t) = P_T(t - \tau) \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} f^4(\theta) \sigma \quad (1)$$

\* 收稿日期:2008-04-22

基金项目:国防预研基金资助项目(9140A04050407JB3201)

作者简介:吴建峰(1981-),男,陕西扶风人,讲师,主要从事防空导弹制导引信一体化及引战配合研究。

E-mail: wjfl331@163.com

$$P_T(t - \tau) = |\varphi_T(t - \tau)|^2 \quad (2)$$

$$P_R(t) = |\varphi_R(t)|^2 \quad (3)$$

式中: $P_R(t)$ 为引信接收功率; $P_T(t)$ 为引信发射功率; $\varphi_T(t)$ 为一复信号,表示引信发射机发射的高频信号; $\varphi_R(t)$ 为引信接收机接收的高频信号; $G$ 为引信天线增益; $\lambda$ 为引信工作波长; $f(\theta)$ 为引信天线方向性函数; $\sigma$ 为目标等效散射面积; $\tau$ 为目标的双程延迟时间。

将式(2)、(3)代入式(1),可得雷达引信的回波方程为:

$$\varphi_R(t) = \varphi_T(t - \tau) \left( \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \right)^{1/2} f^2(\theta) \gamma \quad (4)$$

式中 $\gamma$ 定义为点散射体的复反射系数: $\sigma = |\gamma|^2$ 。

由于导弹相对地面的运动,将会产生时域相移,将引进的点散射体回波的多普勒相移考虑进去,经过相位检波后,式(4)变为:

$$\varphi_R(t) = \varphi_T(t - \tau) \left( \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \right)^{1/2} f^2(\theta) \gamma \exp(j2\pi f_d t) \quad (5)$$

式中 $f_d$ 为多普勒频移。

设PD引信发射的信号脉冲重复频率为 $f_r$ ,幅度为 $A$ ,引信接收机接收到的回波信号在经过采样后进行相干处理时,一个相干处理时间内有 $M$ 个脉冲样本,则地杂波点散射体回波视频信号<sup>[7]</sup>可表示为:

$$S(\theta, m) = \frac{AG\lambda}{(4\pi)^{3/2} R^2} f^2(\theta) \gamma \exp(j2(m-1)\pi f_d/f_r) \quad (6)$$

令 $V = AG\lambda\gamma/(4\pi)^{3/2}$ ,根据网格映象法,此系数是该网格单元内大量散射体散射系数的合成,即:

$$V = \sum_j V_j = \frac{AG\lambda}{(4\pi)^{3/2}} \sum_j \gamma_j \quad (7)$$

将式(7)中的某一散射系数分为2部分,分别对应于散射体的稳定成分和波动成分,则式(7)可拆分成:

$$V = V_c + V_o \quad (8)$$

式中: $V_o$ 为一复随机变量,其幅度满足瑞利分布,相位在 $[-\pi, \pi]$ 上满足均匀分布,其实部和虚部为独立的随机变量,其功率密度满足高斯分布; $V_c$ 为一固定常数,代表杂波回波的固定成分。固定成分和随机成分的相对大小用乘方比 $m^2$ (固定量/随机量)表示,一般取为典型值5左右。

将同一个距离环内所有散射体进行相干求和,得到该距离环内地杂波信号回波为:

$$S(m) = \sum_{i=1}^{N_0} S(\theta_i, m) = \sum_{i=1}^{N_0} (A_c + A_{oi}) f^2(\theta_i) \gamma \exp(j2(m-1)\pi f_{di}/f_r) / R^2 \quad (9)$$

采用高斯分布表示地杂波的频谱特性为:

$$W(f) = W_0 \exp(-f^2/2\delta_c^2) \quad (10)$$

式中: $W_0$ 是零起伏频率时杂波的功率密度; $\delta_c$ 为杂波谱的标准方差。

## 2 引信地杂波回波信号仿真分析

假设雷达引信照射的对象为草地、森林、沙漠或者耕地等散射特性比较均匀的区域,将杂波的后向散射模型看作是幅度分布函数服从瑞利分布,相位在 $[-\pi, \pi]$ 内均匀分布的模型,其频谱满足高斯分布。对地杂波信号进行仿真时,采用滤波器综合法来生成随机序列<sup>[7-8]</sup>。

雷达引信参数及环境参数为:导弹飞行速度为928 m/s,导弹飞行高度为1 500 m,脉冲重复频率为50 kHz,引信工作波长为5 cm,时域采样脉冲数为2 000,方位角范围为55.8°,波束宽度为100,乘方比为5,天线方向图的主峰入射角为50°,波束水平投影宽度为0.267 rad,网格单元数量为256,角度分辨率为0.18°,引信主峰倾角为60°。通过MATLAB仿真,引信地杂波信号视频回波的时域波形、幅度分布和功率谱曲线分别见图1-3。

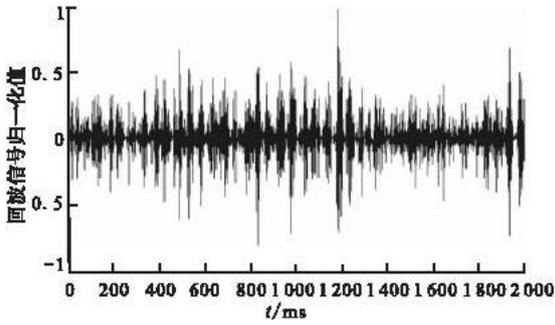


图1 引信地杂波信号的视频回波信号

Fig. 1 Video echo signal of fuze ground clutter signal

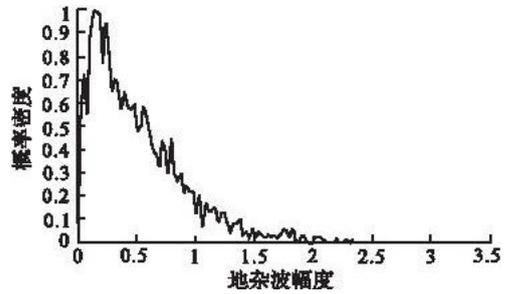


图2 引信地杂波幅度分布图

Fig. 2 Distribution curve of fuze ground clutter signal

由图3可以看出,引信地杂波的幅度分布仍然满足瑞利分布,由于导弹的平台运动,在引信地杂波功率谱图中生成了一个明显的多谱勒频带,引信信号处理的通带下限通常为3 kHz,上述频带的频率范围已经落入了引信信号处理通带。

通过仿真进一步分析,引信地杂波信号在一定的遭遇条件时,由于引信处于低空作战状态,雷达引信波束将可能直接照射地面,同时,考虑到地杂波的面杂波特性以及由距离模糊引起的折叠效应,引信将有可能出现早炸的情况。

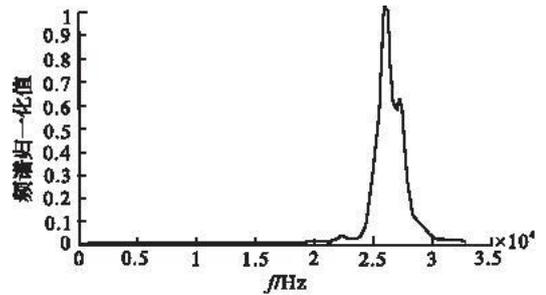


图3 引信地杂波归一化功率谱图

Fig. 3 Normalized power spectrum curve of fuze ground clutter

### 3 克服地杂波引起的早炸问题的技术途径

#### 3.1 频率识别

由图4可以看出,地杂波主谱几乎要淹没目标回波主谱,如果引信的信号处理电路没有对这种杂波信号进行抑制,那么当这个信号的强度达到一定程度时,将会使引信误动作,造成引信早炸。同时,在进攻状态下,目标回波的中心频率总是大于地杂波的中心频谱(尾追情况相反)。因此,可以对目标回波信号和地杂波信号进行频率识别。

1) 弹目共面平行交会时,当波门内的回波最高多普勒频率 $f_{dmax}$ 满足:

$$1.05f_{dd} + \Delta f_{dd}/2 + 1\ 000 \leq f_{dmax} \leq 2(0.95f_{dd} - \Delta f_{dd}/2) \quad (11)$$

时,便可认为有目标进入。

2) 弹目共面交会角 $q \leq 25^\circ$ 时,当波门内的回波最小多普勒频率 $f_{dmin}$ 满足:

$$f_{dmin} \geq 2(1.05f_{dd} + \Delta f_{dd}) \quad (12)$$

时,便可认为有目标进入。

3) 弹目共面交会角 $q \geq 25^\circ$ 时,当波门内的回波最高多普勒频率 $f_{dmax}$ 满足:

$$f_{dmax} \leq 0.95f_{dd} - \Delta f_{dd}/2 - 1\ 000 \quad (13)$$

时,便可认为有目标进入。

因此,只要实时检测回波信号的频谱,就可以得知是否有目标进入。同时,在引信的信号处理通道中,增加一个距离封闭功能,对引信的启动距离进行保护,当引信依据上面的判据判断有目标进入,而且距离封闭通道开启,其它条件又满足时,就可以由引信信号处理电路生成起爆信号起爆战斗部杀伤目标。

#### 3.2 窄带滤波

对于PD引信来说,脉冲重复频率是PD引信克服地杂波干扰影响的一个重要参数。当强地杂波进入引信接收机后,在频率上将会集中在由导弹平台运动引起的多普勒频移点及其各重频点附近。若脉冲重复频

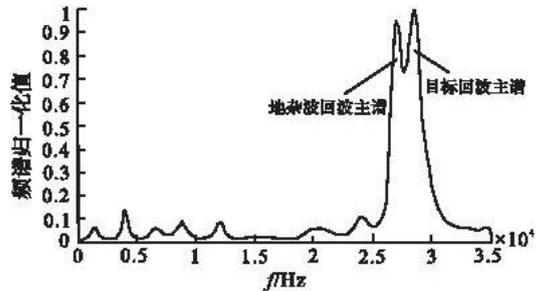


图4 叠加上地杂波的引信视频回波信号功率谱

Fig. 4 Power spectrum of fuze video echo signal addition ground clutter

率的设置导致某个重频使杂波和目标折叠到相同的距离和多普勒频率上,则需要采用足够高的重频在频率域内形成无杂波区。同时,利用敏感多普勒窄带滤波器组进行滤波,实现频谱分离,把所需的运动目标的多普勒谱线滤出来,而把地杂波谱线滤除掉。这样不仅能够提高灵敏度和速度分辨能力,而且能在很大程度上提高信噪比,理论上能做到改善达 70 dB。

在 FFT 或 DFT 数字信号处理技术中,通常采用加权技术来降低旁瓣电平,目前汉宁窗函数加权应用的比较广泛,这有 2 个原因:一是它的频谱结构简单,频谱函数仅有 3 个数据不为零。另一方面,频谱函数系数为  $2^{-1}$  和  $2^{-2}$ ,很容易用右移实现乘法,因而在作加权运算时,可以将时域加权运算的  $N$  点乘法变换为频域的卷积<sup>[9-11]</sup>。根据式(12),卷积运算仅需要 2 次实数加法和 2 次位移,因而频域的频谱函数作卷积仅需要  $2N$  次加法和  $2N$  次移位,实现起来很容易。

汉宁窗频谱函数的第 1 旁瓣约为 -32 dB,第 2 旁瓣约为 -43 dB,旁瓣下降速率为每倍频程 18 dB,到第 4 旁瓣已经达到 -53 dB。尽管它的第 1 旁瓣电平较高,但它的下降速率很快,因而它对远离有用谱线的频域有很强的抑制作用。为了防止它的第 1 旁瓣对邻近谱线的泄露,更好地抑制地杂波,设计滤波器时,可以采取舍弃“0”号滤波器,并“挖掉”第 1 旁瓣的方法。

一般来说,使旁瓣电平降低的同时,其相应的主瓣宽度会增加。对接收机来说,低的旁瓣意味着可以获得较高的信噪比和大的动态范围,而宽的主瓣会使频率分辨率变差,信噪比损失增大,所以加权函数的选择通常是在频率分辨率和动态范围之间折中考虑。假设采用 64 点 FFT,重频为 47 kHz,单位主瓣宽度用  $B$  表示,则  $B = 47/64$  kHz,约为 0.73 kHz,汉宁窗加权后的主瓣宽度增加到  $1.5B$ ,即约为 1.1 kHz,则 3 dB 带宽为 1.05 kHz,这样的宽度符合一般频率分辨的要求。实际上如果 FFT 处理的点数越多,选若干个滤波器作为一个速度窗口,窗口以内的滤波器作放大处理,这时只有信号幅度最大的那个滤波器有输出,并将其作为目标信号。窗口以外的部分滤波器输出作平均处理,平均后的输出值会很小,以便进行频率的精确测定。这样,信号处理的结果,滤波器对信噪比的改善能达到约 53 dB。

## 4 结束语

通过建立引信接收地杂波回波信号的计算模型和仿真计算,可以初步预测和评估雷达引信抗地杂波的能力。为了克服地杂波干扰引起的引信早炸问题,可以对地杂波信号和目标回波信号的主谱进行频率识别,使目标信号与地杂波信号从频谱上实现分离,从而提取目标信号,降低由于地杂波信号引起的引信早炸问题的概率;同时,可以在引信信号处理电路中增设敏感多普勒窄带滤波器组对引信信号进行滤波,进一步降低地杂波信号对引信造成的不良影响。今后的努力方向是对文中提出的克服引信早炸问题的技术途径进行实现及实验论证,以确定方法的有效性;同时,针对各种典型目标,建立相应的弹目遭遇数据库,在对遭遇过程进行全谱分析的基础上,确定各种遭遇姿态下引信的多普勒频带保护范围,以增强引信的抗早炸能力。

## 参考文献:

- [1] G V 莫里斯. 机载脉冲多普勒雷达[M]. 北京:航空工业出版社,1990.  
G V Morris. Airborne Pulse Doppler Radar[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1990. (in Chinese)
- [2] Chen Victor C. Radar Signatures of Rotor Blades[C]// International Society for Optical Engineering. Washington:[s. n.],2001: 63-70.
- [3] 王岩松,张长隆. 常规脉冲多普勒地面雷达杂波建模与仿真[J]. 雷达与对抗,2003(4):26-30.  
WANG Yansong, ZHANG Changlong. Clutter Modeling and Simulation for General Pulse Doppler Ground Radar[J]. Radar & Ecm, 2003(4):26-30. (in Chinese)
- [4] 马丽. 机载雷达视频回波的仿真与模拟[D]. 成都:电子科技大学,2005.  
MA Li. Simulation and Modeling of Video Echo for Airborne Radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology,2005. (in Chinese)
- [5] 张弓. PD 雷达信号处理若干关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2004.  
ZHANG Gong. Study on Key Techniques of Signal Processing for Pulse Doppler Radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)
- [6] Currie N C. Mmw Land Clutter Model Update[C]//International Radar Conference. NY:[s. n. ],1987:217-221.

- [7] Bourier C. Simulation of Radar Sea Clutter Using Autoregressive Modeling and K Distribution[C]//IEEE International Radar Conference. NY:IEEE Press,1995:521-531.
- [8] Jao Jen King, William Gogginst B. Efficient Closed Form Coputation of Airborne Pulse Radar Clutter[C]//IEEE International Radar Conference. NY:IEEE Press,1985:17-22.
- [9] 崔占忠,宋世和.近感引信原理[M].北京:北京理工大学出版社,1998.  
CUI Zhanzhong, SONG Shihe. The Principle of Proximity Fuze[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press,1998. (in Chinese)
- [10] Bassem R, Mahafza D, Elsherbeni Z. MATLAB Simulations for Radar Systems Design[M]. NY:Chapman & Hall/CRC Press LLC,2004.
- [11] 胡广书.数字信号处理[M].北京:清华大学出版社,1997.  
HU Guangshu. Digital Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)

(编辑:田新华)

## Research on Early Burst of the Fuse Caused by Ground Clutter

WU Jian - feng, HE Guang - jun, LEI Hu - min

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan713800, Shaanxi, China)

**Abstract:** Because of the high moving speed of the radar fuse carrier and the short working range of the fuse, in low latitude fight, the ground clutter is more apt to make the fuse burst ahead of the time. This paper sets up a simulation model of the ground clutter echo based on the net image method, analyzes the characteristic of the video signal of the ground clutter received by the fuse, and puts forward utilizing experience criterion to distinguish useful signal from the ground clutter, and using the narrow bandwidth filter to reject the ground clutter which can easily cause early burst of the fuse. The research result provides a technical basis for raising the anti - jamming performance of the fuse still further in the future, and it is very significant for raising the fight performance of the air defense weapon system.

**Key words:** PD fuse; ground clutter; early burst

(上接第23页)

## The Influence of Initial Temperature on the Formation Process of O<sub>2</sub> Plasma

WANG Feng, HE Li - ming, LAN Yu - dan, DU Hong - liang

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** The formation process of the main particles in O<sub>2</sub> plasma at different initial temperatures is numerically simulated. The changes of concentration of the various main particles at different time are tracked, and the law of influence on concentration of the main charged and of the neutral particles in plasma at the initial temperature is obtained in this paper. The calculation results show that the changing law of concentration of main particle in O<sub>2</sub> plasma is similar with the increase of the initial temperature, but the influence on the change trends of concentration of them is not clear. With the time rising, the changes of concentration of e<sup>-</sup>, O, O<sub>2</sub>, O<sup>+</sup> are relatively evident and those of O<sup>-</sup>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sup>\*</sup>, O<sub>2</sub><sup>\*</sup> are relatively minor, but in the end they will come to equilibrium in state. The results are of a certain reference value to the theoretical study and practical application of plasma ignition and assisted combustion.

**Key words:** plasma; particle concentration; initial temperature; chemical reaction; numerical simulation