

# 基于超宽带阵列回波信息的引战配合方法

鲁卫红<sup>1</sup>, 张永顺<sup>1</sup>, 李润玲<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 北京青云航空仪表有限公司, 北京 100086)

**摘 要:**如何保证较高的引战配合效率是超宽带引信系统研究的一个关键技术问题。为获得理想的引战配合效率,基于高斯脉冲的超宽带阵列引信,分析了弹目交汇过程中近程体目标的回波信号,指出不同方向上波形宽度与阵列方向图指向、目标方向角间存在的关系式,提出了利用回波信息估计目标中心位置的方法,在此基础上,结合弹目相对速度,确定起爆点,实现最佳引战配合。仿真结果表明:利用一维均匀超宽带阵列天线的回波进行目标距离、角度位置估计是可行的,该方法是有效的。

**关键词:**超宽带阵列;引信;引战配合

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2010.06.006

**中图分类号:** TJ431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)06-0027-06

随着超宽带技术的发展,超宽带雷达技术得到了广泛关注和研究。防空导弹引信若采用超宽带体制,可以提高引信对目标的探测、识别能力和抗干扰能力。对于弹载超宽带引信,探测目标的距离为几米至几十米,弹目遭遇时间段内,体目标回波主要由目标上几个镜面散射点回波叠加得到。弹目交会过程中,目标相对引信天线的位置不断变化,镜面点位置、RCS 值也相应变化着。对于采用超宽带阵列天线的引信,利用目标回波脉冲可以实现目标距离、角度位置的估计,结合弹目相对速度信息,则可以实现最佳引战配合<sup>[1-7]</sup>。

本文基于采用高斯(Gaussian)脉冲工作的引信,深入分析了在弹目交会过程中具有一维均匀超宽带阵列天线的弹载超宽带引信的近区飞机类体目标的回波特性,进行了目标距离、角度位置估计计算,结合弹目相对速度信息,计算了最佳炸点位置。本文的研究为提高到防空导弹的引战配合效率具有积极意义。

## 1 一维阵列回波信号计算模型

### 1.1 引信相对目标位置计算

在短暂的弹目交会过程中,通常可认为目标和导弹作匀速直线运动。以目标为参考点,导弹以相对速度  $V_R$  向目标运动。在相对速度坐标系中,导弹的运动轨迹是一条过脱靶点  $M(0, \rho \cos \theta', \rho \sin \theta')$  的平行于  $OX_R$  轴的直线,见图 1。图中  $V_T$  为飞机速度,  $V_M$  为导弹速度,  $R_0$  为弹目距离,  $\rho$  为脱靶量,  $\theta'$  为脱靶方位。

在相对速度坐标系中弹道方程为:

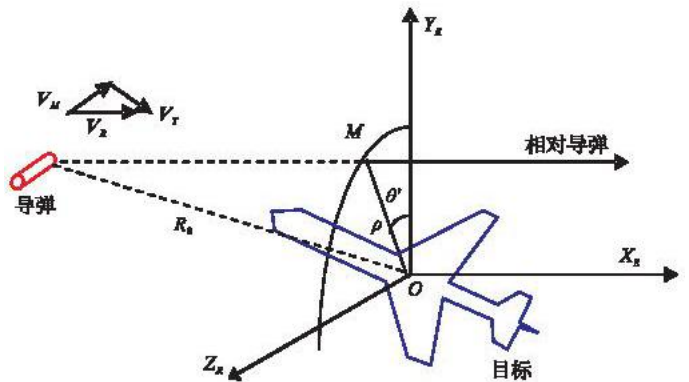


图 1 弹目交会位置关系

Fig. 1 The position relation of target and missile in the encountering course

\* 收稿日期:2009-08-22

作者简介:鲁卫红(1968-),男,河北安平人,副教授,博士,主要从事超宽带引信技术、导弹引战配合技术研究;  
E-mail: lwh\_001@126.com

张永顺(1961-),男,陕西咸阳人,教授,博士生导师,主要从事雷达电子对抗技术研究。

$$x_{MR} = -\sqrt{R_0^2 - \rho^2} + V_R t, \quad y_{MR} = \rho \cos \theta', \quad z_{MR} = \rho \sin \theta' \quad (1)$$

设引信  $i$  ( $i=1-4, 4$  个方位) 线阵中心  $O_{Fi}$  在导弹坐标系的位置为  $(x_{0i}, y_{0i}, z_{0i})$ , 见图 2。

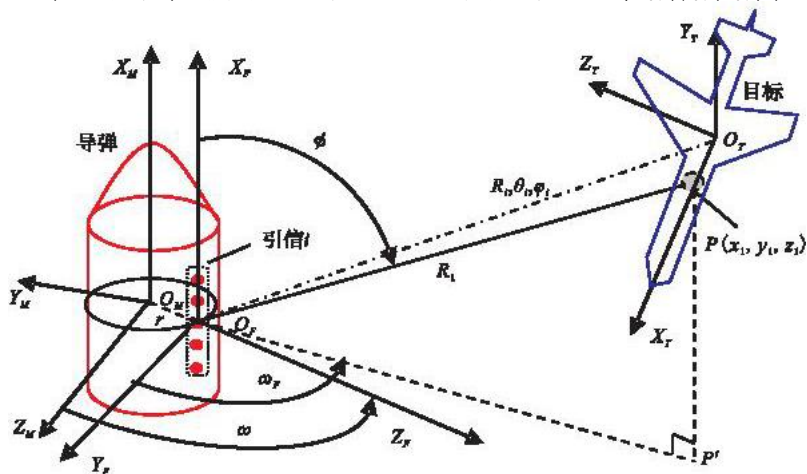


图2 目标与引信相对位置关系

Fig. 2 The relative position relation of target and fuze

若导弹坐标系原点位于战斗部中心, 则:

$$\begin{bmatrix} x_{0i} \\ y_{0i} \\ z_{0i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_F \\ r \cos \phi \\ -r \sin \phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $r$  为弹体半径尺寸;  $\omega$  为线天线阵的方位角;  $L_F$  为引信的中心与战斗部中心的距离。

则  $t$  时刻引信  $i$  在目标坐标系中的运动方程为:

$$\begin{bmatrix} x_{MTi} \\ y_{MTi} \\ z_{MTi} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^T \cdot \begin{bmatrix} x_{R0} + \mathbf{V}_R \cdot t \\ \rho \cos \theta' \\ \rho \sin \theta' \end{bmatrix} + \mathbf{M}_{M-T}^T \cdot \begin{bmatrix} x_{0i} \\ y_{0i} \\ z_{0i} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{A}$  为目标坐标系到相对速度坐标系得转换矩阵;  $\mathbf{M}_{M-T}^T$  为导弹坐标系到目标坐标系转换矩阵的转置。

引信  $i$  在目标坐标系中的极坐标为:

$$R_i = \sqrt{x_{MTi}^2 + y_{MTi}^2 + z_{MTi}^2}, \quad \theta_i = \arccos \frac{x_{MTi}}{\sqrt{x_{MTi}^2 + y_{MTi}^2 + z_{MTi}^2}}, \quad \phi_i = \arctan \frac{y_{MTi}}{z_{MTi}} \quad (4)$$

根据  $R_i, \theta_i, \phi_i$  或  $x_{MTi}, y_{MTi}, z_{MTi}$  可以确定对于引信的复杂目标模型的镜面散射点位置和 RCS 值。

## 1.2 目标上各散射点在引信天线坐标系的位置计算

设目标上某一镜面点  $P$  在目标坐标系的坐标为  $(x_1, y_1, z_1)$ , 点  $P$  在引信  $i$  坐标系中的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_{iP} \\ y_{iP} \\ z_{iP} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{M-Fi} \cdot \mathbf{M}_{T-M} \cdot \begin{bmatrix} x_1 - x_{MTi} \\ y_1 - y_{MTi} \\ z_1 - z_{MTi} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{M}_{M-Fi}$  为导弹坐标系到引信坐标系转换矩阵;  $\mathbf{M}_{M-Fi} = \mathbf{M}_X[\omega_{Fi}]$ ,  $\omega_{Fi}$  为引信线阵  $i$  在导弹坐标系中的安装方位角;  $\mathbf{M}_{T-M}$  为目标坐标系到导弹坐标系转换矩阵;  $x_{MT}, y_{MT}, z_{MT}$  为引信  $i$  坐标系原点在目标坐标系的坐标位置。

通过下式, 可得到散射点在引信坐标系的极坐标  $(R, \omega, \phi)$ :

$$R = \sqrt{x_{iP}^2 + y_{iP}^2 + z_{iP}^2}, \quad \phi = \arccos \frac{x_{iP}}{\sqrt{x_{iP}^2 + y_{iP}^2 + z_{iP}^2}}, \quad \omega = \arctan \frac{y_{iP}}{z_{iP}} \quad (6)$$

## 1.3 回波计算

对于引信  $i$  而言, 其目标回波由目标上各镜面散射点回波叠加得到。每个镜面散射点的回波信号则主要取决于该镜面散射点相对引信的位置、引信阵列天线的脉冲辐射特性、引信发射采用的激励信号及镜面散射点的 RCS 等。

设激励信号为  $s(t)$ , 脉宽为  $T$ , 经延时网络附加时间延迟  $\tau_i (i = -m - m)$  后激励  $2m + 1$  元线阵。相邻阵元时间延迟附加量的差值为  $\Delta t$ 。

引信  $i$  线阵接收的回波  $s_{ri}(t)$  的计算步骤:

步骤1 计算  $t$  时刻引信  $i$  中心在目标坐标系中的位置  $R_i, \theta_i, \varphi_i$  或  $x_{MTi}, y_{MTi}, z_{MTi}$ 。

步骤2 根据目标模型和  $t$  时刻引信位置, 确定目标各镜面散射点位置  $x_{ik}, y_{ik}, z_{ik}, k = 1 - N$  以及 RCS 值。

步骤3 计算  $t$  时刻各镜面散射点在引信坐标系中的位置  $R_{ik}, \omega_{ik}, \phi_{ik}$ 。

步骤4 计算  $t$  时刻线阵  $i$  在各镜面散射点处照射信号:  $e_{ik}(t) = s(t) \otimes F(t, \omega_{ik}, \phi_{ik})$ 。

步骤5 计算各镜面散射点的反射回波信号幅度  $e_{sk}(t)$ : 若已知散射点  $k$  的 RCS 值  $\sigma_k$ , 则  $e_{sk}(t) = \sqrt{\frac{\sigma}{4\pi R^2}} e_{ik}(t)$ 。

步骤6 计算回波信号  $s_{ri}(t)$  [8-10]:

$$s_{ri}(t) = \sum_{k=1}^N e_{sk}(t) \otimes \exp\{-k_m^2 [t - T_m(\theta_i, \varphi_i)]^2\} \otimes F(t, \omega_{ik}, \phi_{ik}) \quad (7)$$

式中:  $k_m = \frac{2\sqrt{\pi}}{T}$ ;  $F(t, \omega_{ik}, \phi_{ik})$  表示线阵的方向性函数;  $T_m(\theta_i, \varphi_i)$  表示时延;  $T_m(\theta_i, \varphi_i) = 2(R_{ik} - R_i)/C$ ,  $C$  表示光速。

### 1.4 单点回波脉冲宽度

根据式(7)可知, 对于含有  $2m + 1$  个阵元的线阵, 阵元间距为  $d$ , 接收的单个镜面点的回波信号波形由  $4m + 1$  个子脉冲合成。不同方向的合成波形时间总宽度约为:

$$\tau' \approx T + |4m(\Delta t + d\sin\theta/C)| \quad (8)$$

### 1.5 仿真与分析

假设飞机体目标上有 3 个镜面散射点, 相对阵列天线的距离和角度起始坐标分别为: 5.3 m, 7.0 m, 9.9 m, 20.3°, 44.1°, 52.6°。设激励信号为  $T = 2$  ns 的高斯脉冲, 阵列参数:  $m = 5, d = 0.25$  m,  $\theta_0 = 0$ , 弹目相对速度为  $V_R = 1500$  m/s, 在 10 ms 的弹目交会时间段, 每隔 0.1 ms 计算一次镜面点相对天线位置和回波信号, 获得相应结果见图 3。

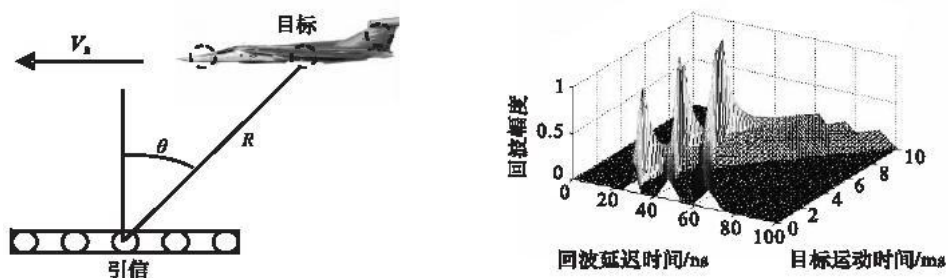


图3 弹目交会过程中的体目标回波信号变化结果

Fig.3 The echo signal of body - target in the encountering course

结果分析:

- 1) 弹目交会过程中, 目标与引信天线相对位置不断变化, 回波脉冲幅度、宽度不断变化;
- 2) 对于超宽带引信而言, 目标各个镜面点的回波的“脉络”清晰可见, 如图 3 中明显的回波“脉络”, 对应 3 个目标镜面散射点;
- 3) 当某个镜面点处于天线方向图指向位置时, 该镜面点对应的回波幅度达到最大, 宽度最窄, 呈现波峰状态, 当偏离天线方向图指向时, 幅度变小, 脉宽按照式(8)的规律改变;
- 4) 改变波束指向位置, 会对回波波峰位置产生影响; 改变线阵阵元间距, 对回波宽度、波形也有影响。

## 2 利用回波信息实现最佳引战配合

上述分析启发我们开展一种新的目标探测和识别方法研究,即探索如何利用天线参数和弹目交会过程中回波“脉络”的时间延迟、波峰位置和脉宽等参数估计出目标上各镜面点的距离和角度参数,进而估计目标要害中心位置,以实现导弹的最佳引战配合。

### 2.1 利用目标回波宽度估计目标位置

对应图3 交会过程的各目标镜面散射点  $p_1, p_2, p_3$  回波脉冲宽度变化规律见图4,符合式(8)的规律。因此,可以利用各点回波脉冲的时间位置确定各点到天线中心的距离,利用各点回波脉冲的宽度估计其偏离天线法线的角度,根据各点距离、角度数据的几何中心便可以获得目标整体中心位置  $(R, \theta)$  的估计。当  $t = 0.1 \text{ ms}$ 、 $1.5 \text{ ms}$  时目标镜面散射点  $p_1, p_2, p_3$  位置估计结果见表1。

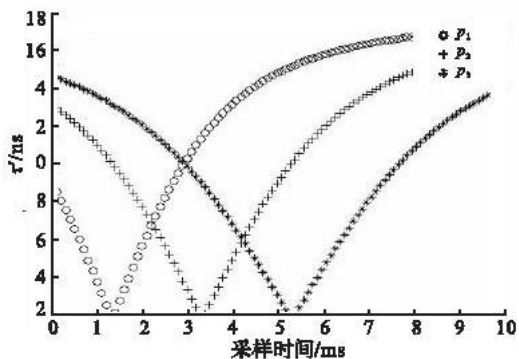


图4 交会过程目标镜面散射点回波脉冲宽度变化规律

Fig. 4 The width value of echo pulse of bright scatter points of target in the encountering course

表1 目标散射点位置估计

Tab. 1 The position estimating of scatter points of target

$t/\text{ms}$	$P$	$R/\text{m}$	$\hat{R}/\text{m}$	$\tau'/\text{ns}$	$\theta/(\text{°})$	$\hat{\theta}/(\text{°})$
0.1	$P_1$	5.3	5.3	8	24.8	21
	$P_2$	7.0	6.9	14	44.1	46
	$P_3$	9.9	9.9	1.5	52.6	51
1.5	$P_1$	4.0	3.9	3	-3.6	-3.4
	$P_2$	5.7	5.6	10	28.8	29
	$P_3$	8.3	8.3	14	43.8	46

结果表明,利用脉宽估计角度位置是可行的。在目标角度位置估计时,需要根据目标脉冲幅度、宽度变化规律,确定目标是接近还是远离,从而确定使用  $\tau' - \theta$  关系曲线的上升或下降段估计角度  $\theta$ 。

### 2.2 利用弹目相对速度和目标位置计算准最佳起爆位置

假设通过一定途径能够得到弹目相对速度估计,结合上述获得的目标位置估计,可以计算引信的最佳起爆位置,见图5。

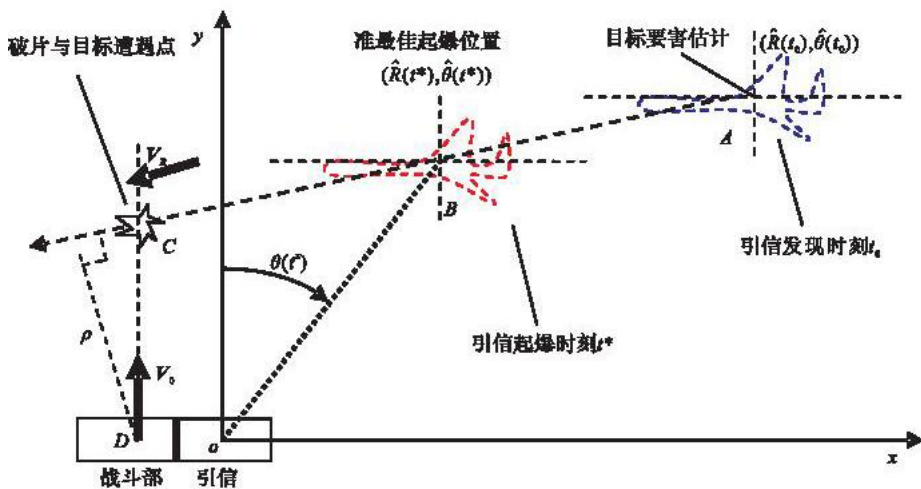


图5 准最佳炸点位置示意图

Fig. 5 The optimal explosive position of warhead

设  $t = t_0$  引信发现目标时刻的目标要害位置估计为  $(R(t_0), \hat{\theta}(t_0))$ , 相对速度估计为  $\mathbf{V}_R = (V_{Rx}, V_{Ry})$ :

$$x_0 = \hat{R}(t_0) \sin \hat{\theta}(t_0), y_0 = \hat{R}(t_0) \cos \hat{\theta}(t_0) \tag{9}$$

$$k = \frac{V_{Ry}}{V_{Rx}}, x = \frac{k^2 x_0 - k y_0}{k^2 + 1}, y = \frac{y_0 - k x_0}{k^2 + 1} \tag{10}$$

以引信中心作为参考点,设在  $t = t^*$  时刻,目标处于位置  $B$  时引信起爆战斗部,则战斗部中央破片正好能击中目标中心。设已知战斗部中心  $D$  点坐标  $(x_D, 0)$ ,战斗部中央破片静态初速  $V_0$ ,导弹速度期望值  $V_M$ ,空气阻力系数为  $K_H$  (取平均值期望估计),则从起爆到命中的破片总飞行时间约为:

$$\Delta t = \frac{(e^{K_H t} - 1)}{\sqrt{V_0^2 + V_M^2 K_H}} \tag{11}$$

式中:

$$r = |DC| \frac{\sqrt{V_0^2 + V_M^2}}{V_0} \tag{12}$$

$$|DC| = \left| \frac{V_{Ry}}{V_{Rx}}(x_D - x_0) + y_0 \right| \tag{13}$$

位置  $C$  的坐标为  $x_C = x_D, y_C = |DC|$ 。位置  $B$  的坐标为:

$$x_B = x_C - V_{Rx} \Delta t, y_B = y_C - V_{Ry} \Delta t \tag{14}$$

设最佳起爆时刻目标要害位置相对引信的倾角为  $\theta(t^*) = \arctan \frac{x_B}{y_B}$ 。设目标要害角位置随时间的估计

为  $\theta(t)$ ,则在未到达起爆点位置时,满足  $\theta(t) < \theta(t^*)$ ;当满足  $\theta(t) \geq \theta(t^*)$  时,引信立即引爆战斗部。

### 2.3 引战配合仿真试验

交会参数:  $V_T = 500$  m/s,  $V_m = 1\,400$  m/s,  $\rho = 5$  m,  $\theta' = 120^\circ$ , 交会角  $0^\circ$ , 交会方位  $180^\circ$ ; 遭遇高度  $9$  km; 战斗部参数:  $V_0 = 2\,000$  m/s, 中央破片静态飞散方向角  $90^\circ$ , 破片静态飞散范围角  $30^\circ$ 。引战配合计算结果见图6。

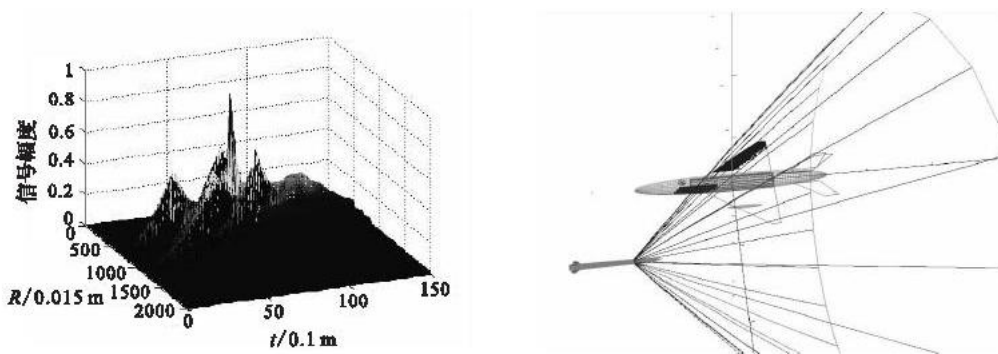


图6 回波信号和起爆时刻弹目相对位置及杀伤部位

Fig.6 The echo signal, the relative position of target and missile, the kill and wound position of target, when the warhead explodes

可见,利用目标距离、角度位置估计确定的炸点位置,战斗部破片杀伤区覆盖了目标中心位置,引战配合效果好。

## 3 结束语

本文基于采用高斯脉冲工作的引信,分析了弹目交会过程中一维均匀超宽带阵列天线的近区飞机类体目标的回波,利用回波实现了目标距离、角度位置估计,结合弹目相对速度信息,计算了最佳炸点位置。对提高防空导弹的引战配合效率有重要意义。

### 参考文献:

[1] Nag S, Bames M A, Payment T, et al. An Ultra - Wide Band Through - wall Radar for Detecting the Motion of People in Real Time[C]//SPIE AeroSense Conference Proceedings. Orlando, FL:IEEE Press,2002:51 - 53.



- [2] Soumya Nagwa, Mark Bames. A Moving Target Detection Filter for An Ultra - wideband Radar [C]//IEEE Radar Conference. FL:IEEE Press, 2003:147 - 153.
- [3] Hussain. Litra - wideband Impulse Radar - An Overview of the Principles [J]. IEEE AES System Magazine, 1998, 9:9 - 14.
- [4] 史志中. 目标识别在防空导弹引战配合中的应用 [J]. 制导与引信, 2008, 29(3):22 - 26.  
SHI Zhizhong. Application of Target ID in Fuze - warhead Matching [J]. Guidance & Fuze, 2008, 29(3):22 - 26. (in Chinese)
- [5] 田波. 超宽带天线及超宽带近炸引信系统研究 [D]. 西安:空军工程大学, 2008.  
TIAN Bo. Research on UWB Antenna & UWB Proximity Fuse System [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2008. (in Chinese)
- [6] 方登建, 关虹, 王文双. 防空导弹近炸引信发展分析 [J]. 海军航空工程学院学报, 2006, 8(4):433 - 436.  
FANG Dengjian, GUAN Hong, WANG Wenshuang. Analysis of Development in Proximity Fuze of Aerial Defence Missiles [J]. Journal of Naval Aeronautical, 2006, 8(4):433 - 436. (in Chinese)
- [7] 杨正龙. 雷达目标建模检测和识别 [D]. 南京:南京科技大学, 2002.  
YANG Zhenglong. Radar Target Modeling Detection and Identification [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2002. (in Chinese)
- [8] Hussain M G M. Antenna Patterns of Nonsinusoidal Waves with the Time Variation of A Gaussian Pulse - Part IV [J]. IEEE trans Electromagn Compat, 1989, 31(1):49 - 54.
- [9] Shirman Yakov D. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering Recognition Detection and Tracking [M]. London: Artech House, 2002.
- [10] 陈宏. 超宽带阵列的时域辐射特性研究 [J]. 电子信息对抗技术, 2008, 8(4):33 - 35.  
CHEN Hong. Research on Time Domain Radiation Characteristic of UWB Array [J]. Technology on Electric Information Counterwork, 2008, 8(4):33 - 35. (in Chinese)

(编辑:田新华)

## A Method of Cooperation of Fuze and Warhead of Missile Based on Echo Information of UWB Array

LU Wei - hong<sup>1</sup>, ZHANG Yong - shun<sup>1</sup>, LI Run - ling<sup>2</sup>

(1. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2. Beijing Keeven Aviation Instrument CO. LTD, Beijing 100086, China)

**Abstract:** Because of the advantage in target detecting, target identifying and anti - jamming, the UWB radar technology has been applied to more fields. It is very important to apply the UWB radar technology to the aerial defence missile for military aim. How to gain bigger cooperative efficiency between fuze and warhead of missile is a pivotal technology problem. The problem can be solved if we can make use of the information of target echo and the relative speed of target and missile well. With the information of target echo in the encountering course of target and missile, the distance value and angle value of target can be estimated. The time domain characteristics of short range target body echo of UWB array are analyzed based on the Gaussian impulse. The mathematical relations between the pulse duration and the most radiation direction of UWB array, the angle of target position are brought forward. A way for angle estimation using pulse duration of target echo is proposed. And the method of improving the cooperation efficiency of fuze and warhead of missile is deduced based on the echo information of UWB array and the relative speed between target and missile. So the best explosion location of warhead of missile for killing target can be calculated. Through simulation and calculation, the feasibility of the new method is verified.

**Key words:** UWB array; fuze; cooperation of fuze and warhead