

## 超宽带雷达引信电磁散射特性

曲婧华<sup>1</sup>, 何广军<sup>2</sup>, 张晨新<sup>2</sup>, 师剑军<sup>2</sup>

(1.中国人民解放军驻上海航天局802所军事代表室,上海,200090;

2.空军工程大学防空反导学院,陕西西安,710051)

**摘要** 分析了超宽带雷达引信在动态作用下的目标散射特性。应用瞬态电磁散射理论和电磁波叠加原理,根据多点散射模型,引入雷达引信动态作用下的传递函数,分析了超宽带雷达引信在动态作用下的目标散射特性,建立了目标冲击响应函数,仿真分析了目标电磁波的辐射方向与脉冲宽度关系,得出高斯窄脉冲经一维超宽带阵列辐射后形成的合成脉冲波如何才能选择合适的阵列参数的结论。研究结论对于设计超宽带雷达引信具有重要的应用价值。

**关键词** 超宽带引信;电磁散射特性;合成波形

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.03.013

**中图分类号** TJ430.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)03-0053-04

### Research on the Ultra Wide Band Radar Fuse Electromagnetic Scattering Characteristic

QU Jing-hua<sup>1</sup>, HE Guang-jun<sup>2</sup>, ZHANG Chen-xin<sup>2</sup>, SHI Jian-jun<sup>2</sup>

(1. Military Representative Office in Shanghai Aerospace Bureau 802 Institute, Shanghai 200090, China;

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

**Abstract:** By using transient EM scattering theory and electromagnetic wave superposition principle, and pulling-in radar fuze transfer function under dynamic effect based on the mode of multi-point scattering, this paper analyzes the target scattering properties of the ultra wide band radar fuze under the dynamic effect, builds up the target IRF, analyzes the relationships between the target's direction of electromagnetic radiation and the pulse width in simulation, and obtains how the synthetic pulse wave formed through undergoing one-dimensional UWB array radiation by Gaussian monocycle to select appropriate array beam parameters. The research is of some significant value to the design of UWB radar fuze.

**Key words:** ultra wide band radar fuze; electromagnetic scattering characteristic; synthetic waveform

超宽带(Ultra Wide Band, UWB)信号是指在半功率点处相对带宽大于25%的信号。超宽带引信,也称为冲击雷达引信,它采用脉宽极窄的高瞬时能量的无载频脉冲探测,信号频谱很宽。超宽带雷达引信具有很好的反隐身能力、反侦察、低截获特性

的反电子干扰能力,具有高距离分辨率、超短程盲区、穿透性好、易于进行目标识别与成像等独特优点,是一种很有前途和实用价值的新体制雷达引信。研究超宽带雷达引信的电磁散射特性,建立其目标回波信号模型,对超宽带雷达引信的目标检测、识别

收稿日期:2013-03-17

作者简介:曲婧华(1982-),女,山东烟台人,工程师,硕士,主要从事目标特性和引战配合技术研究.E-mail:rubywoo0813@hotmail.com

**引用格式:**曲婧华,何广军,张晨新,等.超宽带雷达引信电磁散射特性[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(3):53-56. QU Jinghua, HE Guangjun, ZHANG Chenxin, et al. Research on the ultra wide band radar fuze electromagnetic scattering characteristic[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(3): 53-56.

和定位及引战配合具有重要意义。

## 1 超宽带引信理论与回波建模方法

超宽带引信发射机产生 UWB 脉冲或脉冲串信号,经引信天线向探测区域发射信号,目标被照射后形成散射电磁波将向各个方向传播。散射波在空间的分布依赖于被照射目标的结构、大小、形状以及入射电磁波的频率、极化、目标姿态等,朝向引信的散射波被引信天线接收形成目标回波信号。

与地面雷达不同,引信的目标为近程体目标,波束照射为局部照射。弹目交会过程中,目标的相对姿态、弹目距离、目标散射点的分布变化大。在超宽带冲击信号的激励下,目标的散射中心主要有镜面散射点散射、表面不连续点散射、多次散射、蠕动波或阴影边界散射、爬行波散射等。

同无线电电路理论一样,可以用叠加原理分析引信目标在动态作用下的散射特性。对于引信目标,引入动态作用下的传递函数,它是目标姿态角的函数。设入射信号为  $e_i(t)$ ,则散射信号  $e_s(t)$  的表达式为:

$$e_s(t) = e_i(t) \otimes h(t, \theta, \varphi) \otimes h_r(t) \quad (1)$$

式中:  $\theta$  和  $\varphi$  分别为目标相对引信的方位角和高低角;  $h_r(t)$  为散射信号在自由空间的衰减;  $h(t, \theta, \varphi)$  为目标的冲击响应函数,它与目标到观测点的距离无关。

上世纪 70 年代, Baum C.E 利用奇异展开法得出了目标冲击响应的数学模型:

$$h(r, t) = \sum_a \eta_a(e, s_a) \gamma_a(r) e^{s_a t} + W(e, r, t) \quad (2)$$

式中:  $s_a$  为复自然谐振频率即目标的极点,与目标尺寸有关;  $\eta_a(e, s_a)$  为  $s_a$  的耦合系数,与激励信号的极化和入射方向有关;  $\gamma_a(r)$  为与目标和激励源距离有关的复自然模;  $W(e, r, t)$  为与激励特性、目标和激励源距离有关的整函数时域表达式。

根据瞬态电磁散射理论,任意目标的冲击响应可以由 2 部分不同的波形组成:目标上的不连续边

界产生的冲击分量(即前时响应分量);目标上的感应电流在自然谐振频率点上形成的辐射分量(即后时响应分量)。式(2)可表示为:

$$h(t, \theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M a_m(\theta, \varphi) \delta[t - T_m(\theta, \varphi)] + \sum_{n=1}^N b_n(\theta, \varphi) e^{s_n[t - T_n(\theta, \varphi)]} u[t - T_n(\theta, \varphi)] \quad (3)$$

式中:  $\delta(\cdot)$  为 Dirac 单位冲击函数;  $M$  为前时冲击分量的个数;  $a_m(\theta, \varphi)$  为冲击分量的幅度,与目标姿态有关;  $T_m(\theta, \varphi)$  为冲击分量的时延,与目标姿态有关;  $N$  为后时冲击分量的个数;  $b_n(\theta, \varphi)$  为冲击分量的幅度;  $T_n(\theta, \varphi)$  为冲击分量的时延。

引信作用距离与飞机尺寸接近,由于引信目标的体效应和非平面波局部照射,可以将一个复杂目标分成若干个模块。假定目标的主要回波来自这些模块上的镜面点,而整个引信接收到的回波是所有镜面点回波按幅度、相位及引信方向图函数加权后的叠加。对于 UWB 窄脉冲作用下的多点散射模型,其冲击窄脉冲覆盖的频带宽,对其高频成分,目标处于电磁波的光学区;对其低频成分,目标又处于谐振区。结合上面的表达式和多点散射模型就可以分析超宽带雷达引信电磁散射特性。

## 2 典型目标电磁散射模型

根据飞机目标外形,可以确定散射场的主要镜面反射和不连续点(边缘、棱角、端部)散射点的位置及强度大小。目标散射点分布反映了目标的细节、几何形状与结构特征。应用多点散射模型便可以模拟目标的回波信号。

目标飞机的结构包括机身、机翼、尾翼、垂直安定面、储备舱、驾驶舱等。其中机身、储备舱等可用椭球近似,机翼、尾翼、垂直安定面可用梯形平板近似。表 1 列出了飞机上部分结构模型及数据,给出了散射点的可视区,其他部分可根据实际目标类似给出。表 1 中  $R$  为引信到散射镜面点的距离,  $r$  为椭球体在镜面点处的半径。

表 1 飞机模型方案和数据

Tab.1 Model of aircraft and data of the model

序号	散射体名称	等效反射体	坐标位置	$\sigma_{\max}/m^2$	可视区
1	机身	椭球体	半轴长:7.07,0.66,0.66;中心坐标(0,0,0) 头尾在 $x=6.1, -6.1$ 处截掉 顶点坐标:	$\pi Rr$	任意
2	机翼	梯形平板	(2.1, -0.05, $\pm 0.61$ ); (-3, -0.05, $\pm 0.61$ ); (-2.37, -0.05, $\pm 3.63$ ); (-3, -0.05, $\pm 3.63$ )	$\pi R^2$	$ z  > 0.61$

以机身为例,椭球体的方程为:

$$F(x, y, z) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} - 1 = 0 \quad (4)$$

式中  $a, b, c$  分别为椭球半轴长。椭球表面镜面亮点与引信位置关系见图 1。若镜面点处于梯形平板的边缘,则取镜面点强度  $\sigma=0.2 \text{ m}^2$ ,对于二面角反射器,随弹目相对运动, $\sigma$  不固定,其表达式为:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_{\max} \left[ 1 - \frac{|x_1 + x_2 - 2x|}{x_2 - x_1} \right], & x_1 < x < x_2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

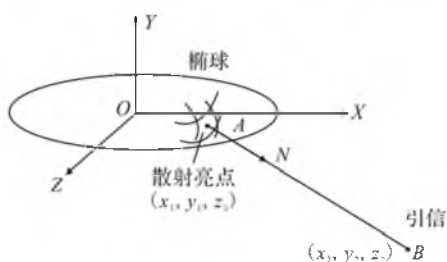


图1 椭球镜面亮点与引信位置关系

Fig.1 Spheroidal mirror-surface plot and fuze's location

### 3 超宽带雷达引信阵列天线辐射信号

在导弹引信上,一般采用线阵天线。线阵的脉冲辐射特性  $F(t, \omega, \varphi)$  可表示为:

$$F(t, \omega, \varphi) = F_1(\omega, \varphi) \sum_{i=-m}^m w_i \delta\{t - \tau_i - \sqrt{R^2 - 2idR\cos\varphi + (id)^2} - R\}/c\} \quad (6)$$

式中:  $F_1(\omega, \varphi)$  为线阵中各辐射单元的脉冲辐射方向特性,  $\omega$  为方位角,  $\varphi$  为高低角;  $w_i$  为第  $i$  个阵元的幅度加权系数;  $c$  为电磁波在空气中的传播速度。式(6)适合于导弹到目标距离较近情况。若目标距离较远,天线尺寸较小,满足  $2md \ll R$  时,式(6)近似为:

$$F(t, \omega, \varphi) = F_1(\omega, \varphi) \sum_{i=-m}^m w_i \delta(t - \tau_i - id\cos\varphi/c) \quad (7)$$

设激励信号为  $s(t)$ , 脉宽为  $T$ , 经延时网络附加时间延迟  $\tau_i, i = -m \sim m$  后激励  $2m+1$  元线阵。相邻阵元时间延迟附加量的差值为  $\Delta t$ 。不考虑阵元间的耦合时,在距离  $i=0$  阵元距离为  $R$  的远区场  $P$  点处线阵的辐射信号可表示为激励信号  $s(t)$  和线阵的脉冲辐射特性的卷积形式:

$$s_0(t, \omega, \varphi) = s(t) \otimes F(t, \omega, \varphi) \quad (8)$$

阵列天线辐射波形由  $2m+1$  个子脉冲合成,其合成信号幅度最大的聚焦方向偏离法线角度  $\theta_0 = \varphi_0 - 90^\circ$  与  $\Delta t$  有关。当  $|\Delta tC/d| < 1$  时,  $\theta_0$  为:

$$\theta_0 = -\arcsin(\Delta tC/d) \quad (9)$$

对于同样的距离,随  $\theta_0 = \varphi_0 - 90^\circ$  的变化,  $2m+1$  个子脉冲在时间上的干涉(重合)程度是变化的,合成信号波形总宽度也相应的变化。根据式(7)、式(8)可知不同方向的合成波形时间宽度为:

$$\tau' = T + 2m|\Delta t + d\sin\theta/c| \quad (10)$$

### 4 仿真分析

通过仿真对阵列天线辐射信号进行分析。设目标的飞行速度取  $V_T = 300 \sim 700 \text{ m/s}$  (低速目标) 和  $1000 \sim 2000 \text{ m/s}$  (高速目标), 目标姿态角  $\alpha_T = -5^\circ \sim 5^\circ, \beta_T = -5^\circ \sim 5^\circ$ ; 引信激励信号  $T = 1 \text{ ns}$ ; 弹目遭遇高度  $H = 0.05 \sim 27 \text{ km}$ , 交会角  $q = 0^\circ \sim 180^\circ$ 。

取引信天线阵列参数:  $m = 5, d = 0.1 \text{ m}, R_0 = 20 \text{ m}, \Delta t = 0.1 \text{ ns}$ 。首先分析目标电磁波的辐射方向与脉冲宽度关系。以中心阵元辐射信号到达时刻为时间 0 点,合成信号波形随角度  $\theta \in -90^\circ \sim 90^\circ$  变化结果见图 2。

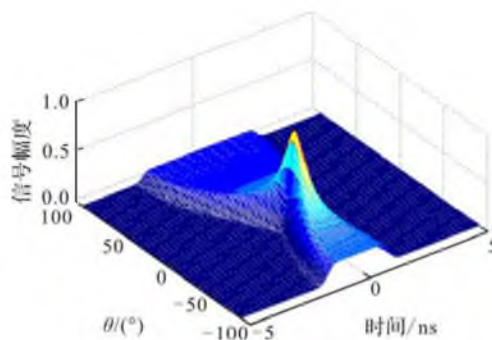


图2 合成信号随角度变化

Fig.2 Composite signals changing with angle distribution

图 2 中纵坐标的信号幅度取最大值的归一化,无量纲。

不同观察角的时域波形是不同的。在  $\theta = \theta_0 = -17.46^\circ$  方向所有阵元的脉冲到达时间一致,其时域波形完全重合,幅度实现叠加而达到最大、脉冲宽度最窄;而在其他方向波形受到到达时间不一致而产生波形畸变,幅度不能完全叠加而脉冲持续时间相应延长,且 2 侧呈现不对称现象。各方向合成脉冲宽度变化曲线见图 3。当  $|\Delta tC/d| > 1$  时,无法聚焦,结果见图 4。

图中 4 中:纵坐标的信号幅度取最大值的归一化,无量纲。

由此可知,需要合理设计网络延迟时间、阵元间距等参数,满足条件  $|\Delta tC/d| < 1$ ,才能使最强辐射方向控制在偏离法线  $-90^\circ \sim 90^\circ$  范围内。用上述同样的模型和方法可以仿真研究辐射波形与天线阵元数、阵元间距、斜距的关系以及辐射信号位置随时间的推移等。

通过仿真分析,得出如下结论:高斯窄脉冲经一维超宽带阵列辐射后形成的合成脉冲波形,其最大辐射方向、聚焦效果、波形等辐射特性与阵元数、相邻阵

元间距、辐射脉冲宽度、观察角度、观察斜距、相邻阵元的网络延迟时间差等参数具有明显的依赖关系。选择合适的阵列参数,满足 $|\Delta tC/d| < 1$ ,  $R_0/2md \geq 1$ 条件下,辐射的合成信号可以较好的聚焦,且最大辐射方向可以控制在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围内,当 $\theta \neq \theta_0$ ,且 $|\theta - \theta_0|$ 越大,则合成信号时宽越大、幅度越小。合成波形的有效宽度与 $\theta$ 具有一定的函数关系。

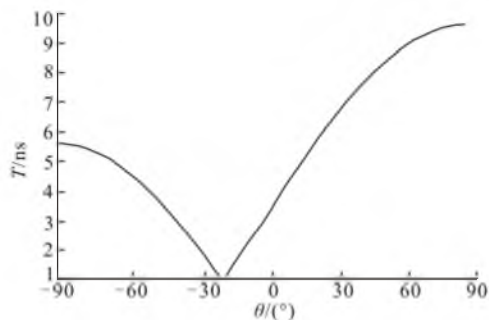


图3 合成信号宽度随角度变化

Fig.3 Width of compositive signals changing with angle distribution

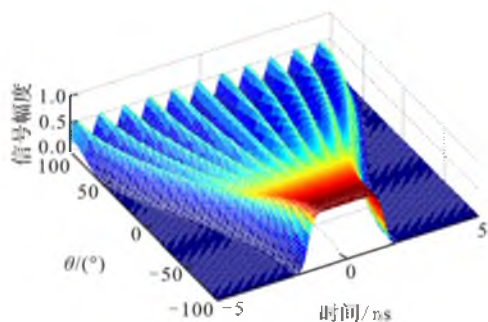


图4  $d=0.1$  m,  $\Delta t=0.6$  ns时,无法聚焦

Fig.4  $d=0.1$  m,  $\Delta t=0.6$  ns(unable focusing)

## 5 结语

本文以超宽带无线电引信的体目标模型为基础,引入雷达引信动态作用下的传递函数,分析了超宽带雷达引信在动态作用下的目标散射特性。在分析过程中特别是结合了目前无线电引信常用的线阵天线做了具体分析。但超快带无线电引信技术是一个新领域,要实际在导弹上实现,还涉及到器件水平、弹上的具体安装及与导弹制导系统综合考虑等诸多问题,这些将是下一步的研究重点。

### 参考文献(References):

[1] 韦道知,何广军,夏训辉,等. 防空导弹无线电引信目标识别优化分析[J]. 火箭与制导学报, 2009, 29(1): 159-165.  
WEI Daozhi, HE Guangjun, XIA Xunhui, et al. Analysis on radar fuse target identification optimization of

ground-to-air missile[J]. Journal of projectiles rockets, missiles and guidance, 2009, 29(1): 159-165. (in Chinese)

- [2] 吕航,何广军,刘彬,等. 超宽带冲激回波信号的三重相关检测算法[J]. 探测与控制学报, 2013, 35(2): 15-19.  
LÜ Hang, HE Guangjun, LIU Bin, et al. Triple correlation algorithm for the UWB impulse echo signal detection[J]. Journal of detection & control, 2013, 35(2): 15-19. (in Chinese)
- [3] Amin M Abbosh, Marek E Bialkowski, Design of ultra-wideband planar monopole antennas of circular and elliptical Shape [J]. IEEE trans antennas propagate, 2008, 56, (1): 17-23.
- [4] Ghali H. Miniaturized ultra wideband fractal antenna [J]. International conference on electrical electronic and computer engineering, 2004, 23: 592-595.
- [5] 何广军,张陆游. 调频无线电引信信号检测方法研究[J]. 探测与控制学报, 2006, 28(3): 19-21.  
HE Guangjun, ZHANG Luyou. Research on the signal-detecting method for frequency modulation radio fuze [J]. Journal of detection & control, 2006, 28(3): 19-21. (in Chinese)
- [6] Igor Y Immoreev, Sergey V Samkov, The Ho Tao. Short distance ultra wideband radar's theory and designing [J]. IEEE aerospace and electronic system magazine, 2005, 40(3): 312-328.
- [7] Mats Rydstrom, Luca Reggiani, Erik G Strom, et al. Adapting the ranging algorithm to the positioning technique in UWB sensor networks[J]. Wireless pers commun, 2008, 47(1): 27-38.
- [8] Fu Chiarnng Chen, Weng Cho Chew. Time domain ultra-wideband microwave imaging radar system [J]. Journal of electromagnetic waves and applications, 2003, 47(2): 313-331.

(编辑:田新华)