

## 具有尾翼的复杂导弹模型超宽带散射特性分析

周新鹏\* 魏国华 吴嗣亮 王旭 王达伟

(北京理工大学电子与信息学院 北京 100081)

**摘要:** 为了满足对复杂导弹测量和检测的需要,该文建立了具有尾翼的复杂导弹模型,研究在极窄脉冲照射条件下该导弹目标散射特性。利用时域有限差分(Finite-Difference Time Domain, FDTD)法计算该导弹模型的瞬时散射回波,分析远场电磁波不同入射条件下导弹散射回波特性及近场不同转角条件下导弹瞬时散射回波特性。通过对该导弹瞬时散射回波特性分析,得出了目标散射中心的成因及散射波形特点,在雷达应用领域具有一定的理论参考价值。

**关键词:** 电磁散射; 冲激脉冲; 有限时域差分法; 导弹模型; 尾翼

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)08-1868-06

DOI: 10.11999/JEIT141238

## Analysis on Ultra-wideband Scattering Characteristics of Complex Missile with Empennages

Zhou Xin-peng Wei Guo-hua Wu Si-liang Wang Xu Wang Da-wei

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to meet the requirement for measurement and detection of complex missile targets, a complex missile model with empennages is established and its scattering characteristics are studied under the conditions of the missile irradiated by extremely short pulse. Transient scattering echoes of the missile model are calculated using Finite-Difference Time Domain (FDTD) algorithm. The characteristics of the missile scattering echoes are analyzed at different incident angle conditions in far field and at different rotational angle of the missile in near field. These analyses on the scattering echo characteristics reveal the causes of the missile scattering centers and characteristics of scattering waveforms, which can provide theoretical reference in radar application.

**Key words:** Electromagnetic scattering; Impulse pulse; Finite-Difference Time Domain (FDTD) algorithm; Missile model; Empennage

### 1 引言

近年来,超宽带技术由于具有高距离分辨率,被广泛应用到雷达领域,例如,测距<sup>[1]</sup>、定位<sup>[2]</sup>、目标识别<sup>[3-5]</sup>、成像<sup>[6,7]</sup>等。这些功能是雷达依据目标电磁散射回波来实现的,因此,研究目标瞬时电磁散射回波特性在雷达应用中具有重要意义。

早期超宽带电磁散射特性主要是在频域中完成的<sup>[8]</sup>。近年来,随着时域电磁学的发展,在时域研究目标散射特性引起了广泛兴趣。当极窄脉冲照射到复杂目标,其回波不再是简单的延时入射波的叠加,而是由目标材料、几何结构和视线角决定散射特性的散射中心回波的叠加。考虑到高斯脉冲特性、目标材料损失和电磁波与目标表面的相互作用,文献[9,10]引入目标冲激响应扩展因子,代替有限理想散射点简单叠加。平板、球体、圆柱体等简单目标的超宽带散射特性被广泛地研究<sup>[11-16]</sup>,获得了大量实

验数据。对于简单目标,在时域中,理论计算、真实实验、仿真试验数据结果都是一致的;但利用理论计算分析飞机、导弹这类复杂目标的散射特性难度较大,目前主要依赖于真实实验和仿真试验研究该类复杂目标的散射特性<sup>[17,18]</sup>。

本文以某型空空导弹为原型,以真实目标尺寸建立导弹模型,以一阶高斯微分为发射信号,利用时域有限差分(Finite-Difference Time Domain, FDTD)法研究该型导弹超宽带瞬时电磁散射特性。首先,建立真实尺寸的导弹模型;其次,在远场平面波、不同入射角条件下进行时域FDTD仿真,分析该导弹模型远场时域散射波形及散射特性;再次,在近场环境,基于单基地雷达,不同转角情况下进行时域FDTD仿真,分析该导弹模型近场瞬时散射特性。

### 2 数学模型

#### 2.1 导弹模型

本文建立导弹3维模型如图1所示,该导弹模

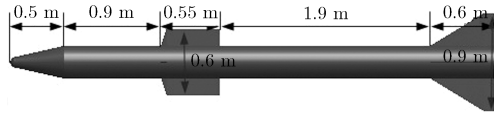


图 1 导弹模型结构及其尺寸

型有一个球冠、一个圆锥体、一个圆柱体及 8 个棱锥体组成，各部分尺寸如图 1 所示。在仿真中，导弹外壳材料选择为铜，导弹外壳厚度为 1 cm，弹体直径为 0.3 m，弹头球冠直径为 0.05 m，弹头球冠与圆锥体相切形成光滑曲面，操纵舵前缘棱边与圆柱体的夹角为 71.57°，尾翼前缘棱边与圆柱体的夹角为 30.96°。

### 2.2 激励信号模型

激励信号波形选择一阶高斯微分信号，该激励信号  $y(t)$  表示为

$$y(t) = A \frac{t - \tau_0}{T} \exp\left[-4\pi\left(\frac{t - \tau_0}{T}\right)^2\right] \quad (1)$$

式中  $T$  为脉冲有效宽度， $t$  是时间变量， $\tau_0$  是延迟时间。

## 3 远场导弹模型散射特性

### 3.1 远场仿真模型

远场仿真模型如图 2 所示，弹头所在方向为  $X$  轴正方向，入射波为式(1)水平极化的高斯微分脉冲，脉冲有效宽度为 1.71 ns。平面电磁波沿方位角  $\beta$ ，仰角  $\theta$  (方位角  $\beta$  为平面波与  $X$  轴正方向的夹角，仰角  $\theta$  为平面波与  $Z$  正方向的夹角)方向入射，幅度  $E_0 = 1$  V。空间步长是 10 mm。吸收边界采用完全匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)吸收边界。

### 3.2 仰角 $\theta = 90^\circ$ 时，入射波在不同方位角下导弹电磁散射特性

对于导弹而言，电磁波主要是对导弹前半球进行照射，因此仿真入射波仰角  $\theta$  为  $90^\circ$ ，方位角  $\beta$  分别为  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 105^\circ, 120^\circ$  时的散射回波。图 3 为平面波激励信号和  $\theta = 90^\circ, \beta = 0^\circ$  时的导弹目标散射回波。图 3 清楚地表明，入射方位角为  $0^\circ$  时，本

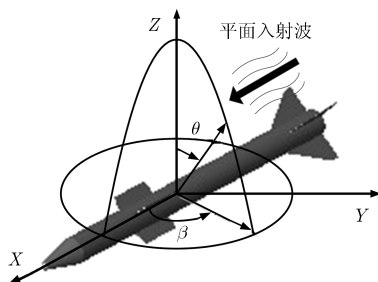


图 2 远场导弹仿真模型

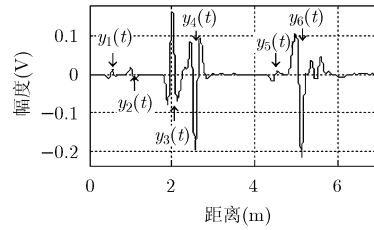


图 3 入射角  $\theta = 90^\circ, \beta = 0^\circ$  时的导弹散射回波  $y_m(t)$

文提供的导弹模型有 6 个强散射回波，表 1 给出了各强散射回波到第 1 个强散射回波的测量距离。由表 1 可知，第 1 个强散射回波是由弹头球冠镜面反射形成的局部滑动散射中心，称之为弹头散射中心；第 2 个强散射回波是由锥体与圆柱体相交不连续处散射形成的边缘散射中心；第 3 个和第 4 个强散射回波分别是由操纵舵前缘和尾翼前缘与圆柱体连接处散射形成的；第 4 个和第 6 个强散射回波分别是由操纵舵后缘尖端和尾翼尖端电磁波绕射形成的。

表 1  $\theta = 90^\circ, \beta = 0^\circ$  时导弹强散射回波的距离(m)

强散射回波 $i$	1	2	3	4	5	6
$R_i$	0	0.505	1.468	2.028	3.943	4.576

为了研究导弹各强散射瞬时回波波形特点，计算波形保真度因子<sup>[13]</sup>。对于两个信号  $a(t)$  和  $b(t)$ ，其波形保真度因子  $F$  定义为

$$F[a(t), b(t)] = \max \int_{-\infty}^{\infty} a_n(t) b_n(t + \tau) dt \quad (2)$$

其中， $a_n(t)$  和  $b_n(t)$  分别为信号  $a(t)$ ， $b(t)$  的归一化：

$$a_n(t) = \frac{a(t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |a(t)|^2 dt}} \quad (3)$$

$$b_n(t) = \frac{b(t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |b(t)|^2 dt}} \quad (4)$$

保真度因子定量描述了  $a(t)$ ， $b(t)$  这两个信号波形的相似程度，保真度因子为 1 时，说明  $a(t)$ ， $b(t)$  这两个信号的波形一模一样，保真度因子为 0 时，说明  $a(t)$  信号波形完全不同于  $b(t)$  信号波形。

利用式(2)分别计算接收到的导弹各强散射回波信号  $y_m(t) (m = 1, 2, \dots, 6)$  与激励信号  $y(t)$ ， $-y(t)$ ，微分信号  $y'(t)$  以及  $-y'(t)$  的波形保真度因子，结果如表 2 所示。第 1 个和第 3 个强散射波形与反相入射波微分信号的波形保真度因子分别为 0.97 和 0.95，这说明这两个强散射波形为反相入射波微分波形；同理可得，第 2 个和第 6 个强散射波形为入射波波形；第 4 个强散射波形为入射波微分波

表 2  $\theta = 90^\circ, \beta = 0^\circ$  时导弹各强散射回波的波形保真度因子

	$y_m(t)$					
	$y_1(t)$	$y_2(t)$	$y_3(t)$	$y_4(t)$	$y_5(t)$	$y_6(t)$
$y(t)$	0.64	<b>0.99</b>	0.84	0.83	0.58	<b>0.92</b>
$-y(t)$	0.88	0.50	0.83	0.84	<b>0.92</b>	0.63
$y'(t)$	0.74	0.79	0.59	<b>0.94</b>	0.70	0.80
$-y'(t)$	<b>0.97</b>	0.82	<b>0.95</b>	0.61	0.56	0.61

表 3  $\theta = 90^\circ, \beta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  时导弹各散射中心的距离(m)

散射中心 $i$	2	3	4	5	6	7	8
$15^\circ$	0.459	1.401	1.938	3.801	4.443	-	-
$30^\circ$	0.399	1.251	1.629	3.394	3.781	3.943	4.166
$45^\circ$	0.280	0.982	1.320	1.543	1.956	2.955	3.227

形；第 5 个强散射波形为反相入射波波形。从图 3 中可以看出，第 1 个、第 2 个和第 5 个强散射回波信号强度近似相等，第 3、第 4 和第 6 个强散射回波信号较强，分别约是弹头强散射回波信号强度的 7.6, 11.3 和 12.5 倍。在 3.0~3.7 m 之间有较弱衰减信号，该信号为目标谐振响应；在 5.5 m 处有一较强的散射回波，可能是由残留在导弹尾翼尖端和圆柱体上的行波形成的。

图 4 为入射波仰角为  $90^\circ$ ，方位角  $\beta$  分别为  $15^\circ, 30^\circ, \dots, 105^\circ, 120^\circ$  时的导弹散射回波。将图 4(a), 4(b), 4(c)和图 3 进行比较，可以看出，随着入射角的变化，目标散射中心距离差有了明显的变化，这是由于入射波为平面波，1 维距离像中第  $i$  个和第  $j$  个散射中心之间的距离差为

$$\Delta d_{i,j} = \Delta l_{i,j} \cos \beta \tag{5}$$

式中， $\Delta l_{i,j}$  为散射点之间的真实距离。表 3 给出了各散射中心到第 1 个散射中心的测量距离，测量的各散射点到弹头散射中心距离小于式 (5) 计算的 距离值，这是由于随着电磁波入射角的变化，某些散射中心在弹体表面移动造成的。

方位角  $\beta$  为  $15^\circ$  和  $30^\circ$  时(图 4(a))，散射点区分很明显，前 5 个散射波形基本没有变化。方位角  $15^\circ$  时的第 6 个散射波形和方位角  $30^\circ$  方位角  $15^\circ$  时的第

3、第 4 散射波形宽度明显变宽，其原因是随着入射方位角变大，位于  $Y$  轴正方向的尾翼散射中心和  $Y$  轴负方向的尾翼尖端散射中心在距离上逐渐分开， $Y$  轴正向的尾翼尖端散射信号和  $Y$  轴负向的尾翼尖端绕射信号叠加在一起，导致散射波变宽。在 4 m 到 5.5 m 区间第 5、第 6 散射中心的波形变化较大，这是由于导弹尾翼的散射中心在该入射方位角下，其距离有了明显的变化，并且其尖端散射和绕射波形相互叠加形成的。

方位角  $\beta$  为  $45^\circ$  和  $60^\circ$  时(图 4(b))，第 3 和第 5 个强散射波形发生了变化，第 3 个强散射波有反相入射波微分变为反向入射波；第 5 个强散射波由反相入射波变为近似反向入射波微分，且其宽度很宽，原因是多个散射点回波叠加形成的。随着入射角的变化，第 1、第 2 散射点逐渐重叠，在方位角  $\beta = 60^\circ$  时，第 1 个散射波形由反相入射波的微分波形变为近似反相入射波，且其幅度增强，这是由于弹头局部滑动散射中心和圆锥体与圆柱体不连续处散射回波大部分重叠的结果；其余散射点相对于在方位角  $\beta = 45^\circ$  时的距离差更小，波形重叠更加明显。

方位角  $\beta = 75^\circ$  时(图 4(c))，部分散射点的波形重叠在一起。在方位角  $\beta = 90^\circ$  时(图 4(c))，有一个最大反射信号，其波形为入射波的微分，是由于入

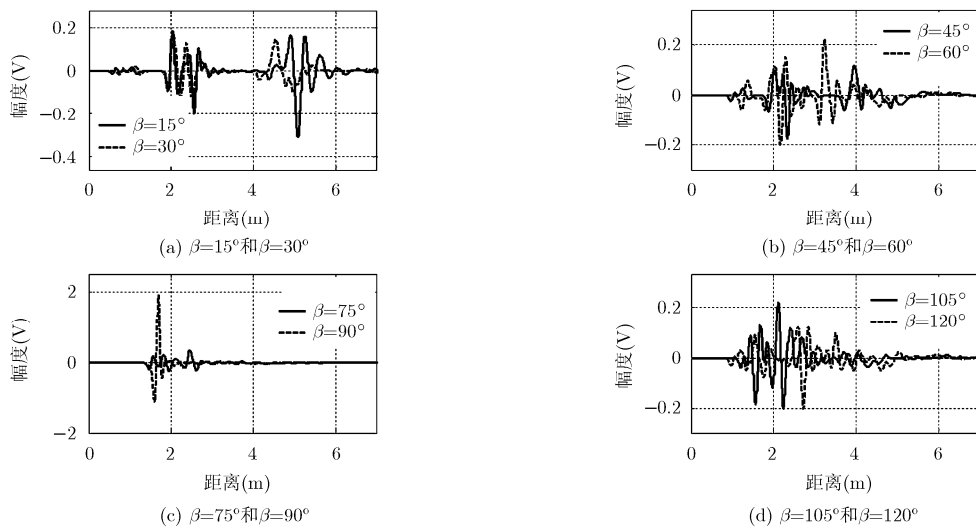


图 4 在入射波仰角  $\theta = 90^\circ$ ，不同方位角  $\beta$  时的远场导弹目标散射信号

射波垂直照射圆柱体时产生的镜面反射, 其余散射信号相对该反射信号很小。当入射波从导弹后半球照射时, 其波形相对比较复杂, 如图 4(d)所示, 对于导弹目标, 一般主要是在导弹的前半球进行检测, 对后半球的散射特征不再分析。

### 3.3 不同仰角时的导弹目标散射特性

改变仰角重新进行仿真实验, 分别在仰角  $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  时, 方位角  $\beta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  时进行仿真实验, 其结果如图 5 所示。将图 5 和图 4(a), 4(b) 对比可知, 在  $\theta > 45^\circ$ , 第 1 和第 2 个强散射中心的散射回波波形及幅度基本是一致的, 这是由于球冠和圆柱体对于导弹的中心轴是对称的, 在任何视角

下结构相同, 所产生的散射特性也相同, 随着仰角减小, 其散射中心之间的距离减小。在  $\theta = 45^\circ$  时, 其第 1 强散射中心和第 2 散射中心重合。而导弹操纵舵和尾翼产生的散射中心较为复杂, 随着不同视线角的变化, 其散射特性有所变化, 相对而言尾翼散射特性随着电磁波入射角的变化而变化得更加剧烈, 这主要是由于散射中心随着电磁波入射角的变化, 其散射波形的相位相互叠加而形成的。

由图 4 和图 5 可以看出, 本文给出带有尾翼的导弹模型, 其散射特性较为复杂, 其复杂性主要表现在操纵舵和尾翼的散射特性。通过分析图 4 和图 5, 可以得到以下结论:

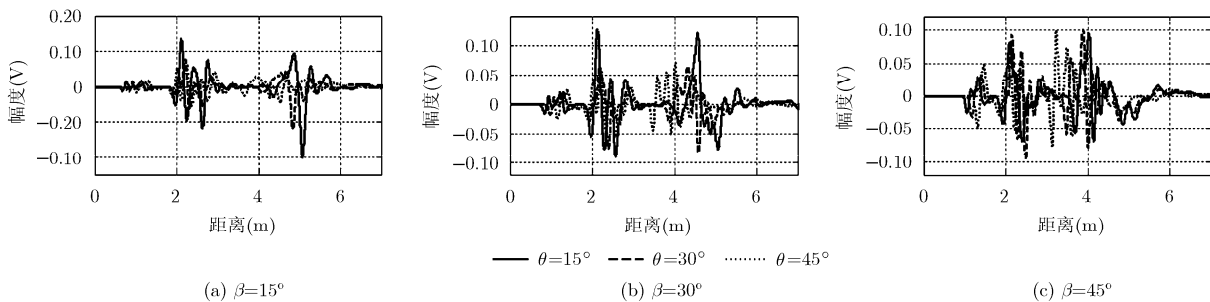


图 5 不同入射波仰角时的导弹模型散射回波

(1) 在方位角  $\beta < 60^\circ$  时, 各散射中心的相对位置基本不变, 各散射中心分别为球冠、圆锥体和圆柱体相交不连续处、操纵舵前缘与圆柱体相交不连续处、操纵舵后缘、尾翼前缘与圆柱体相交不连续处以及尾翼后缘尖端;

(2) 弹头球冠散射中心散射波形为反相入射波微分, 圆锥体与圆柱体连接处散射波形为入射波, 操纵舵前缘和圆柱体连接处散射波形为反相入射波微分, 操纵舵后缘绕射波形为入射波微分, 尾翼前缘和圆柱体连接处散射波形为反相入射波, 尾翼尖端绕射波形为入射波;

(3) 电磁波在照射阴影区的舵和尾翼尖端产生绕射, 形成散射中心;

(4) 在远场, 只有方位角  $\beta = 90^\circ$  时, 圆柱体表面产生垂直反射波, 该反射波信号幅度最强;

(5) 该导弹的电磁复杂性主要体现在操纵舵和尾翼的几何结构和尺寸上。

## 4 近场导弹模型散射特性

建立近场仿真模型如图 6 所示。天线到导弹中心  $R_0 = 5$  m, 导弹围绕导弹中心在  $XOY$  平面上逆时针转动, 每次转动  $15^\circ$ 。选择的波形同上, 极化方向为  $Y$  轴方向。由于是分析导弹散射特性, 不考虑天线传递函数的影响, 仿真中利用式(1)激励点源产生

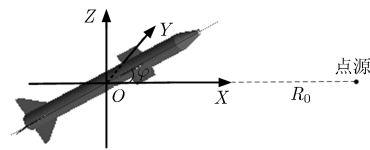


图 6 近场导弹散射仿真模型

球面波, 仿真场景边界为 PML 边界。图 7 为导弹在不同转角下的散射回波。

图 7(a)为导弹模型转角  $\varphi$  为  $0^\circ$  和  $15^\circ$  时的散射回波。为了分析各散射中心的波形, 根据式(2)计算导弹模型转角  $0^\circ$  时各散射中心散射回波的波形保真度因子, 如表 4 所示。第 1 个和第 3 个强散射中心散射回波波形为发射的信号二次微分波形, 第 2, 第 4, 第 5 和第 6 个强散射中心散射回波波形是反相发射信号的二次微分波形。导弹转角为  $15^\circ$  时, 第 4 强散射波形明显变宽, 这是由于多个散射中心散射回波叠加形成的, 而这个散射回波是由操纵舵后缘棱角绕射形成的, 第 6 强散射回波分裂为两个散射波, 这是由于导弹两侧尾翼后缘棱角散射中心的距离有了明显的区别。将图 7(a)与图 3 比较, 导弹模型的散射中心在近场和远场的相对位置是相同的, 但其散射特性不相同, 例如本文提出的导弹模型的弹头球冠散射中心在远场为反相入射波微分的微分, 在近场为入射波的二次微分。

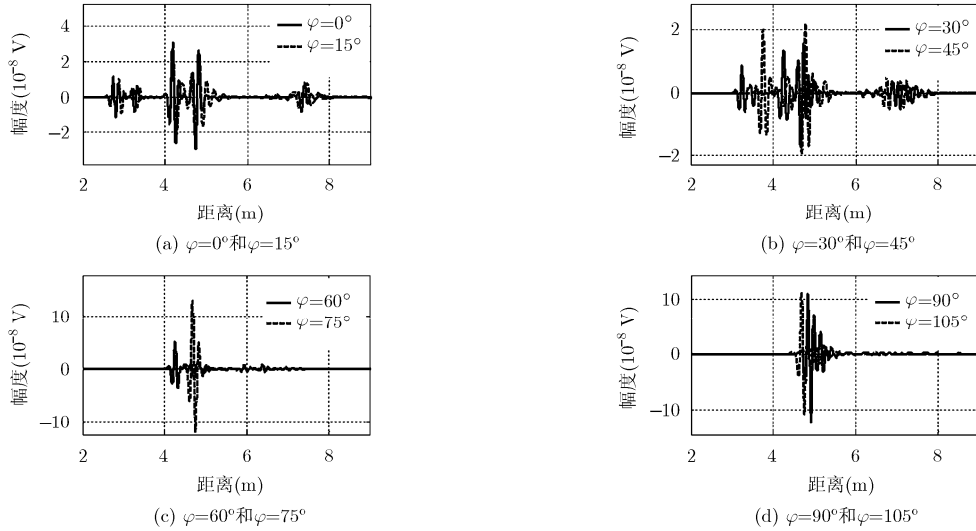


图 7 近场导弹在不同转角  $\varphi$  的散射回波

表 4 导弹转角为  $0^\circ$  时各散射中心回波的波形保真因子

	$y_m(t)$					
	$y_1(t)$	$y_2(t)$	$y_3(t)$	$y_4(t)$	$y_5(t)$	$y_6(t)$
$y(t)$	0.38	0.53	0.51	0.68	0.76	0.69
$-y(t)$	0.47	0.50	0.67	0.51	0.55	0.44
$y'(t)$	0.68	0.60	0.86	0.78	0.91	0.83
$-y'(t)$	0.67	0.79	0.78	0.86	0.75	0.83
$y''(t)$	<b>0.89</b>	0.82	<b>0.98</b>	0.80	0.79	0.73
$-y''(t)$	0.70	<b>0.89</b>	0.79	<b>0.98</b>	<b>0.97</b>	<b>0.99</b>

图 7(b)为导弹转角  $\varphi$  为  $30^\circ$  和  $45^\circ$  时的散射回波，第 1，第 3 强散射波形由发射的信号的二阶微分波形变为反相入射波的微分；导弹尾翼尖端的散射波形发生的变化更加明显。在导弹转角为  $45^\circ$  时，球冠和圆锥体与圆柱体的不连续处的距离小于距离分辨率，其波形叠加在一起；在约 5.12 m 处有一个散射回波，这是由位于电磁波照射阴影区的操纵舵后缘绕射形成的。导弹转角为  $60^\circ$  时(图 7(c))，第 1 个散射中心的散射回波明显增强，这是由于圆锥体的表面产生垂直反射形成的，其余散射中心波形也有较大的变化。

导弹转角  $\varphi$  分别为  $60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ$  时的散射回波见图 7(c)，图 7(d)。此时有一个最强散射回波，其幅度远大于其它散射回波，这是由于当球面电磁波照射到圆柱体时，产生一个镜面垂直反射回波，该镜面垂直反射回波强度远大于其它散射波形强度；且该镜面垂直反射回波的波形和幅度基本相同，其距离在很小的一个区间变化，这说明该回波沿着目标表面随着转角滑动。圆柱体产生镜面垂直反射回波的转角范围如图 8 所示，激励源位于  $P_0$  点(0,0)，假设目标的圆柱体半径为  $r$ ，围绕点  $P_1$  旋转，点  $P_1$  到

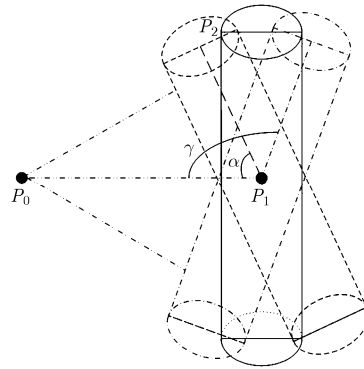


图 8 近场垂直反射范围示意图

圆柱体两端的距离分别为  $L_u, L_d$ ，点  $P_0$  到点  $P_1$  的距离为  $L_0$ 。转角为  $\alpha$  时，其发射波垂直照射圆柱体的顶端，其垂直照射点  $P_2$  的坐标为  $(L_u \cos \alpha + r \sin \alpha, L_u \sin \alpha - r \cos \alpha)$ ，其圆柱体侧边与雷达  $P_0$  到点  $P_1$  的直线的交点为  $(r / \sin \alpha, 0)$ 。则根据三角函数定理可以得到

$$\cos \alpha = \frac{\|P_1 - P_2\|^2 + \|P_1 - P_0\|^2 - \|P_2 - P_0\|^2}{2\|P_1 - P_2\|\|P_1 - P_0\|} \quad (6)$$

如果  $L_0 \gg r, L_u \gg r$ ，式(6)可以简化为  $\cos \alpha \approx L_u / L_0$ ，所以

$$\alpha = \arccos(L_u / L_0) \quad (7)$$

同理可以得到产生垂直反射波的最大转角为

$$\gamma = \pi - \arccos(L_d / L_0) \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知，产生镜面垂直反射波的范围和旋转点到点源的距离以及圆柱体的长度有关。在本文仿真中，转角范围在  $[69.51^\circ \ 116.74^\circ]$  时，产生镜面垂直反射回波。

通过分析近场环境下基于单基地雷达的导弹散

射特性, 总结起来, 可以得到如下结论:

(1) 导弹在近场的散射中心位置和远场基本一致, 但其散射波形有明显区别。

(2) 近场导弹各散射中心的散射波形随着导弹目标转角变化而有所变化。

(3) 导弹在一定转角范围内, 其圆柱体表面会产生镜面垂直反射波, 该散射中心的散射回波幅度远强于其它散射中心。

(4) 在照射阴影区, 电磁波在操纵舵和尾翼的尖端、棱角以及不连续处产生绕射, 形成强散射中心。

(5) 在导弹转角小于 $45^\circ$ 时, 其散射中心的相对位置基本没变。

## 5 结论

本文研究了带有尾翼复杂导弹的超宽带散射特性, 首先通过分析远场该导弹的瞬时散射波的特点, 研究了该导弹远场散射中心成因和随入射角变化特点, 其次通过分析近场该导弹瞬时散射波特点, 研究了近场该导弹散射中心随导弹转角的变化特点及产生垂直反射波的范围。通过对该导弹瞬时散射波特点分析, 得到了该导弹超宽带散射特性的结论, 这些结论对于该型导弹测量、成像、识别具有重要的理论参考价值。

## 参考文献

- [1] Guvenc I, Sahinoglu Z, Orlik P, *et al.* Searchback algorithms for TOA estimation in non-coherent low-rate IR-UWB systems[J]. *Wireless Personal Communications*, 2009, 48(4): 585-603.
- [2] Rongguo Z and Hao Xin. A novel direction of arrival estimation technique using a single UWB antenna[C]. Proceedings of 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Toronto, Canada, 2010: 1-4.
- [3] Salman R and Willms I. A novel UWB radar super-resolution object recognition approach for complex edged objects[C]. Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Nanjing, China, 2010, 2: 1-4.
- [4] Ping F and Zhanrong J. Scattering center estimation of UWB radar target with improved MP method[C]. Proceedings of 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Kunming, China, 2008: 1075-1078.
- [5] Paladini R, Ferro Famil L, Pottier E, *et al.* Point target classification via fast lossless and sufficient invariant decomposition of high-resolution and fully polarimetric SAR/ISAR data[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(3): 798-830.
- [6] Salman R, Willms I, Sakamoto T, *et al.* 3D imaging of a manmade target with weak scattering centres by means of UWB-radar[C]. Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Sydney, Australia, 2013: 109-112.
- [7] Abe Y, Kidera S, and Kirimoto T. Accurate and omnidirectional UWB radar imaging algorithm with RPM method extended to curvilinear scanning model[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 144-148.
- [8] Miller E K and Landt J A. Direct time-domain techniques for transient radiation and scattering from wires[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1980, 68(11): 1396-1423.
- [9] Hussain M G M. Principles of high-resolution radar based on nonsinusoidal waves. III. radar-target reflectivity model[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1990, 32(2): 144-152.
- [10] Hussain M G M and Safar Y A. Pole patterns of radar-target scattering model based on ultra-wideband gaussian pulses[C]. Proceedings of 2001 CIE International Conference on Radar Proceedings, Beijing, China, 2001: 483-487.
- [11] Imbs Y, Chevalier Y, Beillard B, *et al.* UWB measurements of canonical targets with a new broad band wire antenna[C]. Proceedings of 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seattle, USA, 1998: 770-772.
- [12] Tesche F M, Giri D V, and Prather W D. Scattered EM field responses of canonical scatterers illuminated by an impulse-radiating antenna (IRA)[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2009, 51(3): 53-69.
- [13] Lin L, Tan A E C, Jhamb K, *et al.* Characteristics of ultra-wideband pulse scattered from metal planar objects[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(6): 3197-3206.
- [14] Pancera E, Zwick T, and Wiesbeck W. Correlation properties of UWB radar target impulse responses[C]. Proceedings of 2009 IEEE Radar Conference, Pasadena, USA, 2009: 1-4.
- [15] Blalock S, Davis J, Denison D, *et al.* Measured and FDTD calculated ultra wide band (UWB) RCS for treated test fixtures[C]. Proceedings of 2008 European Radar Conference, Amsterdam, Holland, 2008: 436-439.
- [16] Zichang L, Wei G, and Jinpeng F. Narrow pulse transient scattering measurements and elimination of multi-path interference[C]. Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation, Nanjing, China, 2013(1): 408-411.
- [17] Sun H, Zhang Y, and Tian B. Study on ultra-wideband scattering characteristics of targets based on UPML-FDTD[C]. Proceedings of 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, Dalian, China, 2006: 640-643.
- [18] 屈泉西, 郭琨毅, 穆海舰, 等. 基于体目标相对稳定散射中心的脱靶量估计方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(4): 692-699.
- Qu Quan-you, Guo Kun-yi, Mu Hai-jian, *et al.* Miss distance measurement based on stable scattering centers of extended targets[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(4): 692-699.

周新鹏: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为超宽带雷达成像和信号处理。

魏国华: 男, 1977年生, 副研究员, 研究方向为雷达系统及其信号处理。

吴嗣亮: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信号处理理论与技术、目标探测与识别理论与技术、电子系统仿真与信号模拟。