

## 散射中心属性对单脉冲雷达测角的影响研究

郭琨毅 牛童瑶\* 盛新庆  
(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

**摘要:** 角闪烁是末制导阶段角跟踪误差的主要来源, 如果对角闪烁处理不当会增大雷达跟踪目标的误差, 甚至丢失目标。通过脉冲压缩获得高分辨距离像是抑制角闪烁的一种有效方法, 但仍不能完全消除测角误差。研究发现高分辨成像对角闪烁的抑制效果与散射中心类型及其方位特性相关。该文从理论上分析了局部型、分布型、滑动型等不同的散射中心类型对角跟踪产生的影响, 然后通过全波法电磁计算结果验证理论分析结论。该文研究结论对于抑制角闪烁、改善和提高雷达跟踪目标的性能具有参考价值。

**关键词:** 雷达测角; 角闪烁; 散射中心类型

中图分类号: TN953; TN011

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)09-2238-07

DOI: 10.11999/JEIT161223

## Influence of Multiple Scattering Centers with Various Attributes on Radar Angular Measurements

GUO Kunyi NIU Tongyao SHENG Xinqing

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

**Abstract:** Angular glints are the main error sources for radar angular measurement in the terminal guidance, which may result larger tracking error or even lead to losses of the tracking if mishandled. Although the angle glint can be suppressed to some extent through Higher Range Resolution Profile (HRRP) processing, the tracking errors due to multiple scattering centers can not be thoroughly eliminated. It is found in this paper that the tracking errors are closely related with the attributes of scattering centers. The influence on angular measurements induced by scattering centers with various attributes is investigated theoretically and numerically in this paper. For high reliability of numerical results, the scattering responses of extended targets are simulated by the scattered fields computed by the full-wave numerical method in this paper. The reached conclusion of this paper can provide a theoretical reference for the techniques in order to improve the tracing accuracy of extended targets with multiple scattering centers.

**Key words:** Radar angular measurements; Angular glint; Types of scattering centers

### 1 引言

单脉冲跟踪雷达<sup>[1]</sup>的主要功能是测定目标的坐标, 其中目标的角坐标是一个重要的参数。在测量目标角坐标过程中, 角闪烁是影响测角误差的主要因素之一, 且角闪烁的影响随雷达与目标之间距离的减小而增大。导弹制导雷达往往采用振幅和差式单脉冲跟踪雷达, 为了准确地击中目标, 希望能在近距离也有很高的测角精度。这时, 虽然系统噪声等各种因素的影响减小, 但角闪烁引入的测角误差因距离近而更加严重<sup>[2]</sup>, 造成雷达目标的视在位置可

能会落到实际的目标范围外而导致目标的丢失。

雷达目标角闪烁, 即视在角位置的变化, 是目标散射波自身的一种干扰现象, 它是由复杂目标的多散射中心引起的一种相位迭加畸变效应<sup>[3]</sup>。目标角闪烁在本质上属于目标的特征信号, 是目标模型本身的误差, 因此是跟踪制导雷达本身所无法克服的。为此, 针对导引头末段制导中的严重角闪烁现象, 进行导引头角闪烁抑制方法的模拟探讨与研究, 是一件很有意义的工作, 不但可以提高现有雷达制导武器的制导精度, 同时对提升防御型武器装备的隐身效果和防御作用上也将产生积极影响<sup>[4]</sup>。

对于角闪烁抑制问题, 国内外均有研究, 文献[5]给出了可以利用 ISAR 技术, 在多普勒域分开各散射点, 然后对各散射点测角来减少角闪烁现象, 提高成像质量, 此时就需要目标相对于雷达有一定

收稿日期: 2016-11-10; 改回日期: 2017-04-06; 网络出版: 2017-05-11

\*通信作者: 牛童瑶 1136233754@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61471041, 61671059)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471041, 61671059)

转角。但目前使用的主要方法是利用高分辨距离像实现角闪烁抑制<sup>[6,7]</sup>，雷达的距离分辨率越高，抑制角闪烁的效果就越明显。经研究发现角闪烁抑制效果除了受带宽限制外，还受到散射中心属性特点的影响。本文基于全波法(FE-BI-MLFMA，即有限元-边界元-多层快速多级子混合法<sup>[8]</sup>)电磁计算结果，分析了单脉冲雷达体制下3种典型散射中心类型对角坐标3维重构结果的影响，研究结论对提高雷达跟踪目标的精度具有一定的参考价值。

## 2 散射中心类型及属性特征

散射中心简洁而又贴切地反映了雷达目标的物理结构<sup>[9]</sup>，依据其幅度和位置的方位依赖性，可将其归纳为以下3类<sup>[10]</sup>。

### 2.1 分布型散射中心(DSC)

分布型散射中心的散射机理多为镜面和直棱边反射，但最新的研究发现侧面为单曲面的锥体目标，其侧面上的爬行波绕射也可形成此类散射中心<sup>[11]</sup>，其幅度的方位依赖性在属性散射中心模型中描述如式(1)：

$$E^s(\xi, f) = A_i \left( \frac{jf}{f_0} \right)^\alpha \cdot \text{sinc} \left( \frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\xi - \bar{\xi}_i) \right) \cdot \exp \left( \frac{-j4\pi f}{c} (\mathbf{r}_i \cdot \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}}) \right) \quad (1)$$

式中， $A_i$ 和 $L_i$ 分别为分布型散射中心的幅度参数和长度参数。 $f$ 为入射波频率， $f_0$ 为雷达中心频率， $\alpha$ 为频率依赖参数，对于平板、单曲面、直棱边反射形成的分布型散射中心 $\alpha$ 分别为1、1/2和0。 $c$ 为光速。 $\xi(\theta, \varphi)$ 为雷达视线空间角，包含了俯仰角 $\theta$ 和方位角 $\varphi$ ， $\mathbf{r}_i$ 为散射中心在目标坐标系下的位置矢量， $\hat{\mathbf{r}}_{\text{los}}$ 是雷达视向的单位矢量。

### 2.2 局部型散射中心(LSC)

局部型散射中心在目标上的位置相对稳定，在较大视角范围内可见且散射幅度相对于方位角变化较缓慢，也可称之为固定点散射中心，在属性散射中心模型<sup>[12]</sup>中采用衰减的指数函数对其近似描述。

$$E^s(\xi, f) = \left( \frac{jf}{f_0} \right)^\alpha \exp(-2\pi f \gamma_i \sin \xi) \cdot \exp \left( \frac{-j4\pi f}{c} (\mathbf{r}_i \cdot \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}}) \right) \quad (2)$$

式中， $\exp(\cdot)$ 为该散射中心的指数衰减幅度项， $\gamma_i$ 表示局部型散射中心散射幅度的方位角依赖性。

### 2.3 滑动型散射中心(SSC)

滑动散射中心的主要散射机理为表面上的镜面反射，其位置会随着入射波与观测角的变化而发生改变。对于该类散射中心，可采用滑动型散射中心

的模型<sup>[13]</sup>，来描述其位置与幅度相对于方位角的变化情况。

$$E^s(\xi, f) = A_i(\xi, \mathbf{P}, \mathbf{Q}) \cdot \exp \left( \frac{-j4\pi f}{c} (\mathbf{r}_i(\xi) \cdot \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}}) \right) \quad (3)$$

$$A_i(\xi, \mathbf{P}, \mathbf{Q}) = \frac{\sum_{i=0}^n P_i \xi^i}{\sum_{i=0}^{m-1} P_i \xi^i + \xi^m} \quad (4)$$

其中 $\mathbf{P} = [P_0 \ P_1 \ \dots \ P_n]$ 和 $\mathbf{Q} = [Q_0 \ Q_1 \ \dots \ Q_m]$ 为多项式系数向量，根据基于模型的参数估计原理(Model-Based Parameter Estimation, MBPE)<sup>[14]</sup>，分数多项式方程可用于拟合任何有理方程，所以可以用来表示滑动散射中心复杂的幅值变化情况。 $n$ 和 $m$ 的值越大即式中阶数越高，则可以描述更加复杂的幅度起伏。散射中心位置 $\mathbf{r}_i(\xi)$ 也是关于方位角 $\xi(\theta, \varphi)$ 的函数，如果已知曲面的轮廓函数，可以通过后向反射方向与曲面法线方向的平行关系，推导出散射中心的理论位置：

$$\left. \begin{aligned} F(x_i, y_i, z_i) &= 0 \\ \hat{\mathbf{n}}(x_i, y_i, z_i) \times \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中， $F(\cdot)$ 为目标表面方程， $\hat{\mathbf{n}}(x_i, y_i, z_i)$ 为表面某点的法向量，仅当雷达视向与表面法向平行时，该点为反射点位置也即滑动散射中心位置。

## 3 单脉冲雷达的目标角坐标3维重构

单脉冲测角是目前测角雷达中精度最高的一种雷达体制。比幅式单脉冲雷达的原理是在一个角平面内发射两个相同但部分重叠的波束，将两波束的交叠方向称为等信号轴方向，然后利用差波束与和波束之比来确定目标在该角平面内的角位置信息。若要获得目标空间角位置信息，则需要至少4个波束来构成俯仰和方位面。

设 $(\theta, \varphi)$ 为等信号轴的空间角，各子天线的方向图函数为 $F(\cdot)$ ，各波束与等信号轴的夹角为 $(\delta, \delta)$ 。若目标上有 $n$ 个散射点，各散射中心幅度对观测角度的依赖函数记为 $S_i(\cdot)$ (其中 $i = 1, 2, \dots, n$ )可采用上述散射中心模型模拟。各散射中心与等信号轴的夹角为 $(\vartheta_i, \phi_i)$ 。则和波束、俯仰差、方位差通道的回波可表示为

$$\begin{aligned} \Sigma(\theta, \varphi) &\approx \sum_i^n F_\Sigma(\vartheta_i, \phi_i) S_i(\theta, \varphi) \left( \frac{jf}{f_0} \right)^\alpha \\ &\quad \cdot \exp \left( \frac{-j4\pi f}{c} \mathbf{r}'_i(\theta, \varphi) \cdot \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}} \right) \\ &\approx 4F(\delta, \delta) \sum_i^n S_i(\theta, \varphi) \left( \frac{jf}{f_0} \right)^\alpha \\ &\quad \cdot \exp \left( \frac{-j4\pi f}{c} \mathbf{r}'_i(\theta, \varphi) \cdot \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}} \right) \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_{\vartheta}(\theta, \varphi) &\approx \sum_i^n F_{\Delta_{\vartheta}}(\vartheta_i, \phi_i) S_i(\theta, \varphi) \left(\frac{jf}{f_0}\right)^\alpha \\ &\quad \cdot \exp\left(\frac{-j4\pi f}{c} \mathbf{r}'_i(\theta, \varphi) \cdot \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}}\right) \\ &\approx 4F'_{\vartheta}(\delta, \delta) \sum_i^n \vartheta_i \cdot S_i(\theta, \varphi) \left(\frac{jf}{f_0}\right)^\alpha \\ &\quad \cdot \exp\left(\frac{-j4\pi f}{c} \mathbf{r}'_i(\theta, \varphi) \cdot \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}}\right)\end{aligned}\quad (7)$$

$$\begin{aligned}\Delta_{\phi}(\theta, \varphi) &\approx \sum_i^n F_{\Delta_{\phi}}(\vartheta_i, \phi_i) S_i(\theta, \varphi) \left(\frac{jf}{f_0}\right)^\alpha \\ &\quad \cdot \exp\left(\frac{-j4\pi f}{c} \mathbf{r}'_i(\theta, \varphi) \cdot \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}}\right) \\ &\approx 4F'_{\phi}(\delta, \delta) \sum_i^n \phi_i \cdot S_i(\theta, \varphi) \left(\frac{jf}{f_0}\right)^\alpha \\ &\quad \cdot \exp\left(\frac{-j4\pi f}{c} \mathbf{r}'_i(\theta, \varphi) \cdot \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}}\right)\end{aligned}\quad (8)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned}F_1 &= F(\vartheta - \delta, \phi - \delta); F_2 = F(\vartheta - \delta, \phi + \delta) \\ F_3 &= F(\vartheta + \delta, \phi + \delta); F_4 = F(\vartheta + \delta, \phi - \delta) \\ F_{\Sigma} &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ F_{\Delta_{\vartheta}} &= F_3 + F_4 - F_1 - F_2 \\ F_{\Delta_{\phi}} &= F_2 + F_3 - F_1 - F_4\end{aligned}\right\} \quad (9)$$

宽带导引头接收机的 3 个通道可输出 3 个高分辨距离像, 再利用上述的单脉冲测角技术, 可以获得目标上各散射中心的方位、俯仰角度信息<sup>[15]</sup>, 如式(13)所示。

各通道的 1 维距离像输出可表示为

$$\begin{aligned}\text{RP}_{\Sigma}(r, \xi) &= \text{FFT}_f[\Sigma] \\ &\approx \text{FFT}_f\left[4F(\delta, \delta) \sum_i^n S_i(\theta, \varphi) \left(\frac{jf}{f_0}\right)^\alpha \right. \\ &\quad \left. \cdot \exp\left(\frac{-j4\pi f}{c} \mathbf{r}'_i(\theta, \varphi) \cdot \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}}\right)\right] \\ &= 4F(\delta, \delta) \sum_i^n S_i(\theta, \varphi) \text{FFT}_f \\ &\quad \cdot \left[\left(\frac{jf}{f_0}\right)^\alpha \exp\left(\frac{-j4\pi f}{c} \mathbf{r}'_i(\theta, \varphi) \cdot \hat{\mathbf{r}}_{\text{los}}\right)\right] \\ &= 4F(\delta, \delta) \sum_i^n S_i(\theta, \varphi) \overline{\text{RP}}_i(r, \theta, \varphi)\end{aligned}\quad (10)$$

同理,

$$\text{RP}_{\Delta_{\vartheta}}(r, \xi) \approx 4F'_{\vartheta}(\delta, \delta) \sum_i^n \vartheta_i \cdot S_i(\xi) \overline{\text{RP}}_i(r, \xi) \quad (11)$$

$$\text{RP}_{\Delta_{\phi}}(r, \xi) = 4F'_{\phi}(\delta, \delta) \sum_i^n \phi_i \cdot S_i(\xi) \overline{\text{RP}}_i(r, \xi) \quad (12)$$

则测角输出结果为<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned}\hat{\vartheta} &= \text{Re}\left[\frac{\text{RP}_{\Delta_{\vartheta}}(r, \xi)}{\text{RP}_{\Sigma}(r, \xi)} \cdot \frac{1}{k_{\vartheta}}\right] = \text{Re}\left[\frac{\sum_i^n \vartheta_i \cdot S_i(\xi) \overline{\text{RP}}_i(r, \xi)}{\sum_i^n S_i(\xi) \overline{\text{RP}}_i(r, \xi)}\right] \\ \hat{\phi} &= \text{Re}\left[\frac{\text{RP}_{\Delta_{\phi}}(r, \xi)}{\text{RP}_{\Sigma}(r, \xi)} \cdot \frac{1}{k_{\phi}}\right] = \text{Re}\left[\frac{\sum_i^n \phi_i \cdot S_i(\xi) \overline{\text{RP}}_i(r, \xi)}{\sum_i^n S_i(\xi) \overline{\text{RP}}_i(r, \xi)}\right]\end{aligned}\quad (13)$$

$$\text{其中, } k_{\vartheta} = \frac{F'_{\vartheta}(\delta, \delta)}{F(\delta, \delta)}; k_{\phi} = \frac{F'_{\phi}(\delta, \delta)}{F(\delta, \delta)}.$$

观察式(13)可知, 当 1 维距离像中各散射中心可以分辨时, 每个距离单元只包含 1 个散射中心回波, 测角输出结果为各散射中心与等信号轴的偏角 $(\vartheta_i, \phi_i)$ 。由散射中心的径向距离、等信号轴空间角, 可重构出各个散射点在目标坐标系中的位置 $\mathbf{r}'_i(\xi)$ 。由一定观测时间积累的测角输出结果, 可以重构出目标散射中心 3D 分布图像, 此图像只反映目标主要散射中心的空间角位置分布, 而不反映幅度信息。

当某个距离单元的回波是由多个散射中心贡献的, 则雷达测得的目标位置是这多个散射中心等效的视在中心方向, 即出现了角闪烁噪声现象, 显然此时重构的角位置不属于任何散射中心, 有可能偏出目标几何体之外导致目标的丢失。为了改善此情况, 一般会对一定观测方位的角闪烁起伏噪声作平均处理, 以降低跟踪误差。然而, 从式(13)可见, 散射中心幅度的方位特性会对测角输出的方位起伏性造成一定程度的影响。不同散射中心类型的属性特征对测角输出的影响情况也不同。

#### 4 散射中心属性特征对其角位置 3 维重构的影响

通过 1 维距离像及单脉冲测角输出结果可以重构目标上对应散射中心的空间位置。由式(13)可知, 不同的散射中心, 由于其幅度的方位依赖性 $S(\xi)$ 不同, 对散射中心角坐标 3 维重构结果也会产生不同的影响。下文对其逐一进行分析。

##### 4.1 分布型散射中心测角及其 3D 成像结果

对于分布型散射中心来说, 其等效位置在其几何中心, 分布长度为 $L$ 。等效位置不随着雷达视线的变化而改变。由于其幅度对方位的依赖性采用式(1)描述, 可见只有在特定的角度下 $\xi = \bar{\xi}_i$ , 才会有很强的散射回波, 其余角度下散射回波强度迅速减小。因此, 在 1 维距离像历程图中, 该散射中心表现为强亮点, 并且具有很高的旁瓣, 如图 1(a)所示。

通过 1 维距离像提取散射中心时, 在某些方位

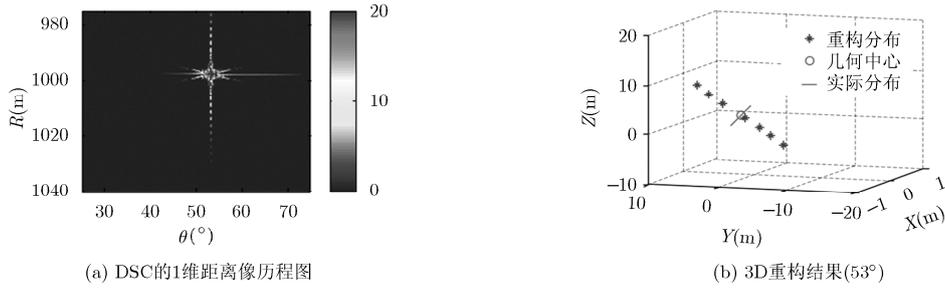


图 1 DSC 的 1 维距离像历程图及其 3D 成像

上, 例如  $\theta = 53^\circ$ , 旁瓣较强, 常会超过信号检测电平, 此时会被误认为另外的散射中心, 虽然测得的角度相同, 但分布的距离不同, 所以重构得到在空间扩展成线, 且与实际散射中心分布情况垂直的一系列散射中心, 如图 1(b)所示, 其中实线为该散射中心实际位置分布。在 1 维距离像历程图中, 该类散射中心像的距离向旁瓣由散射中心频率特性、发射信号波形、以及脉冲压缩处理所决定, 采用加窗处理可以一定程度上抑制旁瓣。但由于此类散射中心幅度很强, 其旁瓣的幅度可能与弱散射中心的幅度相当, 因此抑制旁瓣可能会造成弱散射中心的丢失。

4.2 局部型散射中心测角及其 3D 成像结果

对于局部型散射中心来说, 其位置始终固定于目标上。此类散射中心在很大的雷达观测角度范围内均能看到, 且幅度随雷达观测角度的变化起伏不大。因此在雷达能观测到的角度范围内, 其 1 维距离像历程图为峰值起伏不大的亮线, 如图 2 所示。对于此类散射中心, 只要距离可以分辨, 一般可以准确地还原其角度及其在目标坐标系中的位置, 如图 3 所示。观测角度方位为  $\theta = 60^\circ \sim 90^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ , 雷达信号带宽为 500 MHz。

4.3 滑动型散射中心测角及其 3D 成像结果

对于滑动型散射中心, 其位置随着雷达观测方位角的改变在目标光滑表面上滑动。此类散射中心幅度的方位依赖性见式(4)。散射中心在 1 维距离像中表现为亮度渐变的曲线, 如图 4 所示。

此类散射中心一般也具有较强的幅度, 若可以

分辨时, 测角输出可以还原出此类散射中心的位置, 只不过不同方位下的输出结果不同, 这是由于散射中心位置本身的滑动所造成, 如图 5 所示。测得的目标位置与实际位置坐标  $X, Y, Z$  的误差分别为  $1.70 \times 10^{-16} \text{ m}, 0.11 \text{ m}, 0.08 \text{ m}$ , 相对误差为 0%, 0.7%, 1.6%。

由于散射中心在不同方位下的位置不同, 在本地坐标下的 3D 重构图像会形成一条曲线, 该曲线恰好可以刻画出目标的轮廓信息。一方面, 由于散射中心的位置滑动造成整体多散射中心分布中心的变化, 这对精确定位不利; 而一方面, 连续的位置变化可以反演目标的轮廓, 这对目标识别又是有利的。因此为了提高对流线型类目标的制导精确, 要对类散射中心的属性特点合理利用。

5 典型目标测角测距 3 维成像结果

为了验证上述分析, 下文给出实际两种弹头类目标的单脉冲测距测角 3D 重构结果。目标 1 为锥体、柱体和锥台的组合体, 底面边缘为台阶状的棱边型结构, 目标 2 为流线型圆锥体弹头结构, 具体几何参数见表 1。目标电磁散射数据通过已得到可靠性验证的精确全波数值法(FE-BI-MLFMA<sup>[6]</sup>)计算获得。图 6 为目标几何结构和各散射中心位置分布图。图 7 为和通道目标 1 维距离像历程图。

对于目标 1, 由图 7(a)可知, 在  $\theta = 70^\circ$  时, 散射中心 LSC1 和 DSC3 起主要作用, 但由于分布型散射中心 DSC3 旁瓣较高, 因此通过和通道回波提取散射中心时会将其旁瓣误认为目标上另外的散射

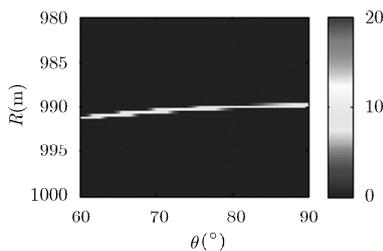
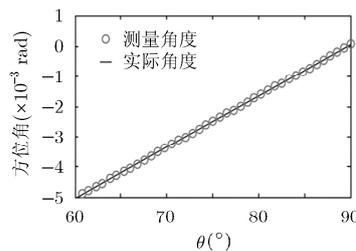
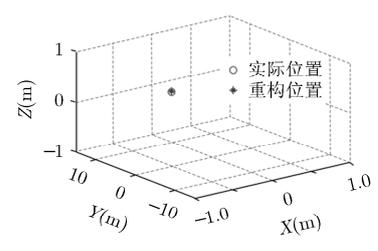


图 2 LSC 的 1 维距离像历程图



(a) 雷达测角结果与理论角度对比图



(b) 3D 重构结果

图 3 LSC 测角和 3D 成像

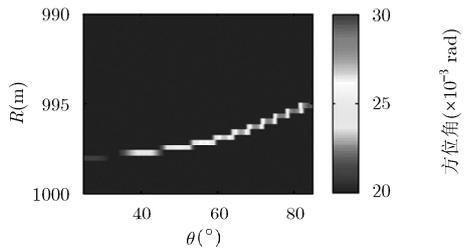
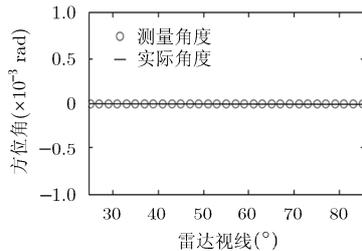
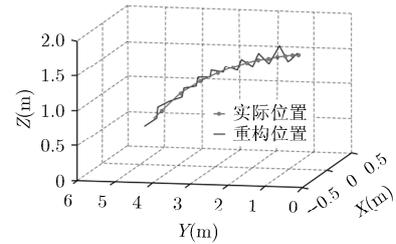


图 4 SSC 的 1 维距离像历程图



(a) 雷达测角结果与理论角度对比图



(b) 3D 重构结果

图 5 SSC 测角和 3D 成像

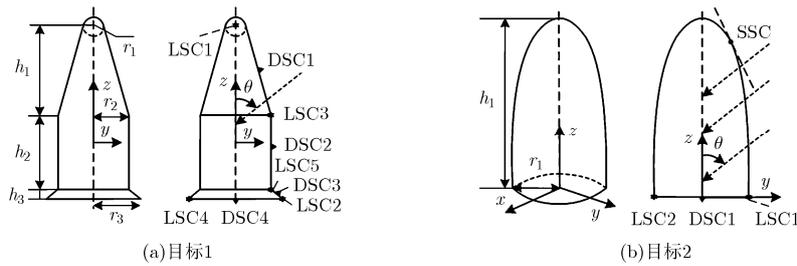
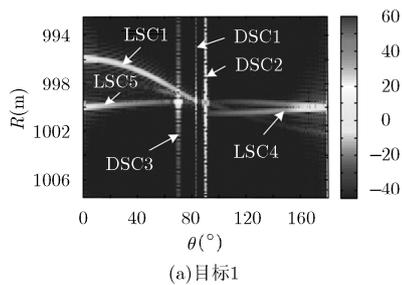
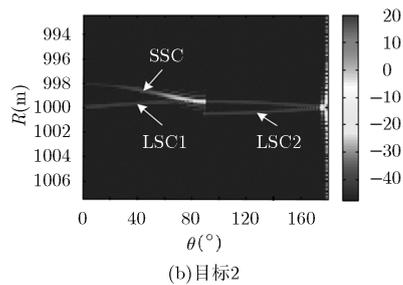


图 6 目标几何结构及散射中心分布示意图



(a) 目标 1



(b) 目标 2

图 7 目标 1 维距离像历程图

表 1 目标尺寸(m)

目标	r1	r2	r3	h1	h2	h3
目标 1	0.15	0.4	0.5	1.986	1.8	0.275
目标 2	0.5	-	-	1.95	-	-

中心回波，得到的目标 3 维重构结果见图 8(a)。由图可知，对于 DSC3，不能够很好地还原分布型散射中心的空间位置，造成目标制导精度的下降，且由于 DSC3 回波旁瓣的影响，局部型散射中心 LSC1 并没有在 3 维图像中展现出来，造成目标上部分散射中心的丢失。

考虑到实际雷达导引头跟踪目标时，目标相对雷达的角度是不断变化的，因此测角和成像是实时的，图 8(b)给出了雷达观测角在 60° ~ 85° 时，目标 1 的 3 维重构结果，在此角度范围内能观测到局部型散射中心 LSC1，分布型散射中心 DSC1 和 DSC3。由此图可见，对于 LSC 来说，雷达在其可观测角度范围内，一般可以较好地还原此类散射中

心的空间位置，得到稳定的 3 维重构结果。但对于 DSC 来说，由于其只在很窄的角度范围出现，且旁瓣影响较大，所以随着观测角的改变，3D 重构得到的空间位置不稳定且杂乱无章，出现了很多虚假信息，严重时，可使雷达指向偏离、甚至丢失目标。

对于目标 2，由图 7(b)可知，在  $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$  时，滑动型散射中心 LSC1 和 SSC 起主要作用，且两者在距离向可分辨，因此几乎不存在角闪烁现象，得到目标上 SSC 的 3D 重构结果如图 9 所示。此滑动型散射中心还原后位置与理论位置相对误差分别为 0%，5.4%，2.4%，可见，在此角度范围内通过雷达测距测角得到的目标 3 维结构能够较好地还原出此类散射中心的空间位置。图中虚线和实线分别代表滑动散射中心的实际位置和还原后的位置。

通过观察以上目标的 3 维结构重构图，可以知道目标上不同散射中心属性会对测角及 3D 重构产生不同的影响。现将各类散射中心对测角成像的影响，总结归纳如表 2 所述。

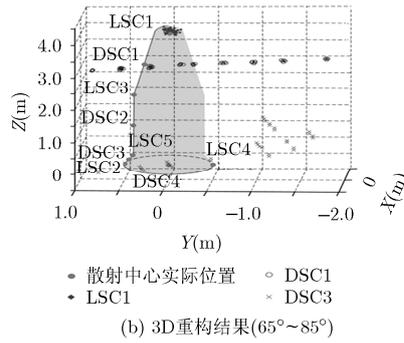
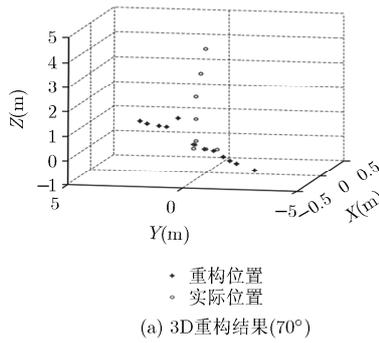


图8 目标1的3D重构结果

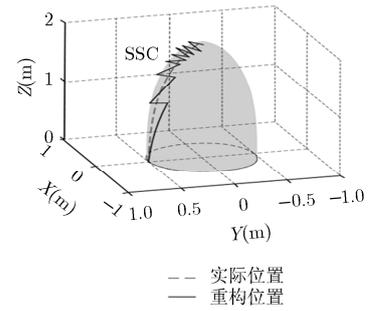


图9 目标2的3D重构结果(0°~90°)

表2 散射中心类型与3D重构结果的对应关系

散射中心类型	3D 重构结果
局部型散射中心	对于孤立的散射中心能够较为精确地重构其空间位置,但由于其散射幅度弱,易受附近散射中心的干扰
分布型散射中心	散射强度高,因此距离维旁瓣较高,导致重构出多个虚假散射点,且方位向的幅度扩展也可能淹没附近目标较弱的散射中心,造成散射中心的丢失
滑动型散射中心	散射强度较高,一般能够较为精确地重构其空间位置,但散射中心位置随视线变化在目标表面滑动,因此不同观测角度下重构的位置不同

## 6 结束语

经研究可知,不同的散射中心类型会对角跟踪产生不同的影响,角闪烁抑制效果与目标散射中心属性有很大关系。雷达对于孤立的局部型散射中心一般可以实现较好的角跟踪,但由于其散射幅度弱,易受附近散射中心的干扰;对于分布型散射中心,由于其散射强度很高,距离维一般存在较高的旁瓣,易造成多个虚假散射中心,导致定位误差。另外,由于该类散射中心的方位特性,其方位向的幅度延展也会淹没附近较弱的散射中心,造成信息的丢失,可见即使1维距离像分辨率足够高时,分布型散射中心也会对角跟踪产生影响;对于滑动型散射中心,单个雷达观测角度下,一般可以实现对其较好的定位,但值得注意的是,由于该类散射点中心的位置随着雷达视线在流线型表面滑动,因此不同雷达观测角度下所重构的位置不同。本文的结论对于抑制角闪烁、改善和提高雷达跟踪目标的方法研究具有参考和指导意义。

## 参考文献

[1] SHERMAN S M and BARTON D K. Monopulse Principles and Techniques[M]. London, Artech House, 2011: 19-31.

[2] 刘立国,莫锦军,付云起,等.基于图形电磁学的近场角闪烁预估方法研究[J].电子与信息学报,2013,35(4):865-870. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01573.  
LIU Ligu, MO Jinjun, FU Yunqi, et al. Study on near field angular glint computation based on GRECO[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(4): 865-870. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01573.

[3] HOWARD D D. Radar target glint in tracking and guidance system based on echo signal phase distortion[J]. *Proceedings of NEC*, 1959, 15: 840-849.

[4] 庄亚强,张晨新,张小宽,等.角闪烁抑制与控制技术综述[J].现代防御技术,2015,43(1):52-58. doi: 10.3969/J.ISSN.1009-086X.2015.01.009.  
ZHUANG Yaqiang, ZHANG Chenxin, ZHANG Xiaokuan, et al. Discussion of the suppression and control technology of angular glint[J]. *Modern Defence Technology*, 2015, 43(1): 52-58. doi: 10.3969/J.ISSN.1009-086X.2015.01.009.

[5] 马长征.雷达目标三维成像技术研究[D].[博士学位论文],西安电子科技大学,1999.  
MA Changzheng. Radar three dimensional imaging techniques[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 1999.

[6] 赵宏钟,何松华.基于高分辨距离像的单脉冲角跟踪技术[J].电子学报,2000,28(4):142-144.  
ZHAO Hongzhong and HE Songhua. Angular tracking technology based on high range resolution profile[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(4): 142-144.

[7] 张涛,张群,马长征,等.基于高分辨距离像的角闪烁抑制方法[J].西安电子科技大学学报,2001,28(3):296-300.  
ZHANG Tao, ZHANG Qun, MA Changzheng, et al. Angular glint suppression method based on high resolution range profile[J]. *Journal of Xidian University*, 2001, 28(3): 296-300.

[8] SHENG X Q, JIN J M, SONG J M, et al. On the formulation of the hybrid finite-element boundary-integral methods for 3D scattering using multi-level fast multipole algorithm[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1998, 46(3): 303-311.

[9] 屈泉酉.雷达目标散射中心模型及其应用[D].[博士学位论文],北

- 京理工大学, 2015.
- QU Quanyou. Scattering center models of radar targets and their applications[D]. [ Ph.D. dissertation], Beijing Institute of Technology, 2015.
- [10] 郭琨毅, 牛童瑶, 屈泉西, 等. 散射中心的时频像特征研究[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 478-485. doi: 10.11999/JEIT150598.
- GUO Kunyi, NIU Tongyao, QU Quanyou, *et al.* Research on signatures of scattering centers shown in time-frequency representation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 478-485. doi: 10.11999/JEIT150598.
- [11] POTTER L C and MOSES R L. Attributed scattering centers for SAR ATR[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 5(1): 79-91.
- [12] QU Quanyou, GUO Kunyi, and SHENG Xinqing. An accurate bistatic scattering center model for extended cone-shaped targets[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(10): 5209-5218.
- [13] GUO Kunyi, LI Qifeng, SHENG Xinqing, *et al.* Sliding scattering center model for extended streamlined targets[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2013, 139(3): 499-516.
- [14] GUO Kunyi and SHENG Xinqing. A precise recognition approach of ballistic missile warhead and decoy[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2009, 23(14-15): 1867-1875.
- [15] 马健, 钱涛, 周剑雄. 基于高分辨距离像测角的 ISAR 图像横向往定标[J]. 空军预警学院学报, 2016, 30(3): 178-182. doi: 10.3969/J.ISSN.2095-5839.2016.03.005.
- MA Jian, QIAN Tao, and ZHOU Jianxiong. Cross-range scaling of ISAR image based on angle measurement with high resolution range profiles[J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2016, 30(3): 178-182. doi: 10.3969/J.ISSN.2095-5839.2016.03.005
- [16] 张思远, 李永祯, 肖顺平. 空间两点源的单脉冲测角极化响应研究[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(5): 467-472. doi:10.1369/J.ISSN.1672-2337.2015.05.004.
- ZHANG Siyuan, LI Yongzhen, and XIAO Shunping. Polarimetric response for dual-point sources in monopulse angular measurement system[J]. *Radar Science and Technology*, 2015, 13(5): 467-472. doi: 10.3969/J.ISSN.1672-2337.2015.05.004.
- 郭琨毅: 女, 1976 年生, 副研究员, 博士, 主要研究方向为目标散射特性、目标成像、目标识别技术等.
- 牛童瑶: 女, 1991 年生, 硕士生, 研究方向为目标散射特性.
- 盛新庆: 男, 1968 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算电磁学、目标电磁特性、微波成像及遥感、天线理论及设计等.