

# 相位梯度法计算近场角闪烁的解析式

范红旗,王 胜,祝依龙,付 强

(国防科技大学 ATR 实验室 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 角闪烁作为重要的目标特征信号,对雷达系统的影响主要发生在目标近场,而目前的角闪烁预估大多基于远场假设,针对这一现实问题,提出了一种基于散射中心模型的近场角闪烁预估技术.首先基于散射中心模型表示近场散射,然后通过直接求解相位函数的空间导数,得到了近场条件下相位梯度法的严格解析式,最后结合末制导条件给出了相应的简化公式.结论表明:黄培康等人《雷达目标特征信号》一书中的相位梯度法仅是本文在特定极化方式下的远场近似,而且在末制导距离范围内,所给出的近似式具有良好的精度,这些结果为近场角闪烁预估及其特性研究提供了理论依据.

**关键词:** 电磁散射;角闪烁;近场;相位梯度法

**中图分类号:** TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 05-0937-05

## An Analytic Expression for Computing Near Field Angular Glint by Phase Gradient Method

FAN Hong-qi, WANG Sheng, ZHU Yi-long, FU Qiang

(ATR Laboratory of National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** As an important signature of the radar target, the angular glint effects on radar system mainly arise at near field. However, the current prediction methods of angular glint are mostly based on the far field condition. This paper presents a prediction technique of near field angular glint based on the scatter-center model to solve this problem. Firstly, the near field backscattering is represented based on scatter-center model. Then by solving the derivative of the backscattering phase vs. the position vector of the observer, including incident angles and range, we get the exact expression of angular glint at near field. Finally, the exact expression is approximated and simplified in the range of terminal guidance. The conclusions of the paper show that the expression by HUANG Pei-kang in the book 'Radar Target Signatures' is the approximation of ours at far field under certain polarization, and that the simplified expression has a well precision in the range of terminal guidance. All these results provide the theoretical basis for the prediction of near field angular glint and its signature research.

**Key words:** electromagnetic wave scattering; angular glint; near field; phase gradient method

### 1 引言

众所周知,角闪烁是与 RCS 同等重要的雷达目标特征信号,它对雷达系统的影响主要发生在目标近区.随着寻的末制导技术的飞速发展,目标角闪烁特性获得了越来越多的关注<sup>[1,2]</sup>.当导弹接近目标时,一方面,角闪烁成为寻的制导系统的主要跟踪误差源<sup>[3,4]</sup>;而另一方面,作为目标特征信号,它可以为目标运动模型辨识、目标识别等提供丰富的信息<sup>[5]</sup>.因此,建立角闪烁预测模型对于目标角闪烁特性的研究、角闪烁的抑制与利用等研究都具有十分重要的现实意义.

目前,关于角闪烁的产生机理,通常有相位波前畸变和能流密度倾斜两种解释,相应计算方法有相位梯度法和波印亭矢量法.黄培康院士在《雷达目标特征信

号》<sup>[1]</sup>一书中证明了在满足几何光学近似下,两种计算方法是等效的,并给出了远场条件下的计算公式.然而,在末制导距离范围内,对工作于光学区的末制导雷达而言,大都不满足远场近似条件.比如,当  $\lambda = 5\text{cm}$  的雷达作用于最大尺寸  $d = 20\text{m}$  的目标时,远场条件 ( $r > 2d^2/\lambda$ ) 要求距离大于 16km.那么,当远场条件不能满足时,文献[1]的计算公式还能否适用?再进一步,近场角闪烁又该如何计算呢?

为了回答这些问题,本文首先基于光学区散射中心模型得到了近场条件下目标的后向散射表示;然后直接求解其相位函数的空间导数,从而得到了相位梯度法计算近场角闪烁的严格解析式,并证明了文献[1]中的相位梯度法仅是本文在特定极化方式下的远场近似;由于严格解析式形式较为复杂,随后在考虑了导引头雷达

收稿日期:2008-03-24;修回日期:2008-12-08

基金项目:国家 973 重点基础研究(No. 51314);国防科技预研跨行业综合技术(No. 51301050102)

典型作用距离的基础上,对严格解析式作了一定的简化;最后通过仿真验证了本文结果的正确性.

## 2 问题描述

理论计算和实验测量均表明,在光学区,目标总的电磁散射可认为是某些局部位置上电磁散射的合成,这些局部性的散射源通常被称作散射中心<sup>[1]</sup>. 散射中心作为光学区电磁散射的重要特征,表示了其周围局部区域的散射特性,因此,本文作如下假设:

理论假设:在所考虑的距离范围内,无论目标是否处于雷达远场,每个散射中心所在的局部区域总是满足远场条件.

实际上,这一假设为近场目标特性研究所广泛采用<sup>[6,7]</sup>. 在此假设之下,便可以利用远场提取的散射中心模型来研究目标的近场散射特性. Bhalla R 和 Ling H<sup>[8]</sup>利用 SBR 方法建立的远场散射中心模型来预估近场 RCS,其结果与电磁计算数据和实测数据都相当吻合,进一步证明了如上假设的合理性. 事实上,假设 20m 的目标上均布 20 个散射中心,则每个散射中心所表示区域的尺寸约为 1m,  $\lambda = 5\text{cm}$  则远场条件所给定的距离 40m 远小于一般雷达的盲距.

基于上述假设,当目标不满足远场条件时,一方面,入射到目标的电磁波虽不能视作平面波,然而由于雷达口径  $D$  一般远小于目标尺寸,此时的入射波可视作球面波;另一方面,每个散射中心所在的局部区域则满足远场近似,无论是入射波还是散射波皆可视作平面波. 近场条件下雷达入射与目标散射的关系如图 1 所示.

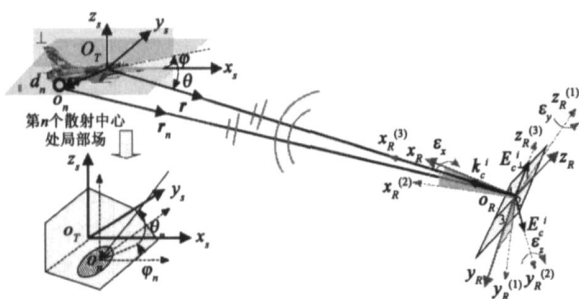


图1 近场入射-散射关系示意图

图 1 中:

$O_T$ 、 $O_R$  分别表示目标中心和雷达天线中心,  $O_n$  表示目标上第  $n$  个散射中心.

平面  $\perp$ 、 $\parallel$  分别表示散射中心建模时垂直和水平两个极化参考面.

目标系  $(x, y, z)$ , 下雷达天线的位置与姿态可由矢量  $[r, \theta, \phi, \psi]^T$  唯一确定,其中,  $[r, \theta, \phi, \psi]^T$  为目标系下天线位置矢量  $r$  球坐标形式,  $(\theta, \phi, \psi)$  表示由雷达天线系  $(x, y, z)_R$  按照 XZY 顺序旋转到入射参

考系  $(\hat{k}_c^i, \hat{E}_c^i, \hat{E}_c^i)$  时的三个旋转角,具体旋转关系如图 1 所示;具体到末制导系统而言,  $\theta$  对应天线相对于极化参考面的旋转角,  $\phi$ 、 $\psi$  则分别为  $y$ 、 $z$  方向的视线角误差.

$[r_n, \theta_n, \phi_n]^T$  则为第  $n$  个散射中心到雷达的距离矢量  $r_n$  在目标系下的球坐标形式.

令:雷达发射功率为  $P_t$ , 天线最大增益、方向图函数、收发的极化方式分别为  $G$ 、 $F(\cdot)$ 、 $h^r$  和  $h^i$ ;  $c_n$  分别表示  $\overrightarrow{O_R O_T}$ 、 $\overrightarrow{O_R O_n}$  与天线电轴  $\overrightarrow{O_R X_R}$  的夹角;  $R(\cdot)$  为极化旋转矩阵;  $S_{n, n, n}$  表示  $(\theta_n, \phi_n)$  入射方向下第  $n$  个散射中心的单站线极化散射矩阵.

下面推导中,省去时谐因子  $e^{j\omega t}$ , 则雷达处总的散射场强  $E^s$  为:

$$E^s = \sqrt{P_t G} (R(\cdot) h^r)^T \left[ \sum_n \frac{F^2(\theta_n)}{4 r_n^2} S_{n, n, n} \exp(-2jkr_n) \right] \cdot R(\cdot) h^i \quad (1)$$

根据近场 RCS 的定义<sup>[9]</sup>, 我们可以导出近场散射矩阵  $S$  的定义如下:

$$S(r, \theta, \phi, \psi, F(\cdot), V, k) = \frac{F^2(\theta_n)}{F^2(\theta_c)} \cdot \frac{r_c^2}{r_n^2} \cdot S_{n, n, n} \exp(-2jkr_n) \quad (2)$$

其中:

$$\begin{aligned} r_n &= |r_n| = |r - d_n|; \\ c &= \arccos(\cos(\theta_y) \cos(\theta_z)); \\ n &= \arccos(-\hat{x}_R \cdot \hat{r}_n); \end{aligned}$$

$V$  表示目标的物理结构.

显然,  $S$  表示了  $(\theta, \phi)$  方位下目标的全极化散射矩阵,与远场得散射矩阵相比,它除了与目标的物理结构  $V$ 、波数  $k$ 、以及入射角  $(\theta, \phi)$  有关外,还与雷达到目标中心的距离  $r$ 、天线瞄准误差  $\theta_z$ 、 $\phi_z$ 、以及天线方向图  $F(\cdot)$  有关.

将  $S$  代入  $E^s$ , 可将散射场强  $E^s$  重新表示为:

$$E^s = \frac{4 F^2(\theta_c)}{r^2} \sqrt{P_t G} (R(\cdot) h^r)^T S R(\cdot) h^i \quad (3)$$

## 3 角闪烁计算公式的推导

为了表示简便起见,下文推导中将极化旋转矩阵  $R(\cdot)$  简单记作  $R$ , 并记:  $S = S^{\text{Re}} + j \cdot S^{\text{Im}}$ . 由于末制导过程中瞄准误差  $\theta_c$  近似等于跟踪误差,一般为 mrad 量级,因此下面考虑  $\theta_c = 0$  的情形.

(3) 中  $E^s$  的相位函数可以表示为:

$$\begin{aligned} \angle(r, \theta, \phi) &= -\arg(E^s) = -\arctan \frac{V_N}{U_N} \\ &= -\arctan \left( \frac{(Rh^r)^T S^{\text{Im}} Rh^i}{(Rh^r)^T S^{\text{Re}} Rh^i} \right) \quad (4) \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} S^{\text{Re}} &= (S_{n,n}^{\text{Re}} \cos(2kr_n) + S_{n,n}^{\text{Im}} \sin(2kr_n)) \cdot F^2(n) \cdot \frac{r^2}{r_n^2} \\ &= A_n \cdot (S_{n,n}^{\text{Re}} \cos n + S_{n,n}^{\text{Im}} \sin n) \\ &= S_n^{\text{Re}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} S^{\text{Im}} &= (-S_{n,n}^{\text{Re}} \sin(2kr_n) + S_{n,n}^{\text{Im}} \cos(2kr_n)) \cdot F^2(n) \cdot \frac{r^2}{r_n^2} \\ &= A_n \cdot (-S_{n,n}^{\text{Re}} \sin n + S_{n,n}^{\text{Im}} \cos n) \\ &= S_n^{\text{Im}} \end{aligned} \quad (6)$$

按照相位梯度法的基本原理<sup>[1]</sup>, 可得到角闪烁线偏差信号如下:

$$\begin{aligned} e &= \frac{\partial}{\partial r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} = \frac{(\text{Rh}')^T \left[ U_N \frac{\partial S_n^{\text{Im}}}{\partial r} - V_N \frac{\partial S_n^{\text{Re}}}{\partial r} \right] \text{Rh}^i}{(\text{Rh}')^T \left[ U_N \frac{\partial S_n^{\text{Im}}}{\partial r} - V_N \frac{\partial S_n^{\text{Re}}}{\partial r} \right] \text{Rh}^i} \\ e &= \frac{\partial}{\cos \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial r} = \frac{(\text{Rh}')^T \left[ U_N \frac{\partial S_n^{\text{Im}}}{\partial r} - V_N \frac{\partial S_n^{\text{Re}}}{\partial r} \right] \text{Rh}^i}{(\text{Rh}')^T \left[ U_N \frac{\partial S_n^{\text{Im}}}{\partial r} - V_N \frac{\partial S_n^{\text{Re}}}{\partial r} \right] \text{Rh}^i} \\ &\quad \cdot \frac{1}{\cos \theta} \end{aligned} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{\partial S_n^{\text{Re}}}{\partial r} \\ \frac{\partial S_n^{\text{Re}}}{\partial r} \\ \frac{\partial S_n^{\text{Re}}}{\partial r} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} S_n^{\text{Im}} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + S_n^{\text{Re}} \cdot \frac{\partial \ln A_n}{\partial r} \\ S_n^{\text{Im}} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + S_n^{\text{Re}} \cdot \frac{\partial \ln A_n}{\partial r} \\ S_n^{\text{Im}} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + S_n^{\text{Re}} \cdot \frac{\partial \ln A_n}{\partial r} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{\partial S_n^{\text{Im}}}{\partial r} \\ \frac{\partial S_n^{\text{Im}}}{\partial r} \\ \frac{\partial S_n^{\text{Im}}}{\partial r} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -S_n^{\text{Re}} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + S_n^{\text{Im}} \cdot \frac{\partial \ln A_n}{\partial r} \\ -S_n^{\text{Re}} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + S_n^{\text{Im}} \cdot \frac{\partial \ln A_n}{\partial r} \\ -S_n^{\text{Re}} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + S_n^{\text{Im}} \cdot \frac{\partial \ln A_n}{\partial r} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \end{bmatrix} &= 2k \begin{bmatrix} \frac{\partial r_n}{\partial r} \\ \frac{\partial r_n}{\partial r} \\ \frac{\partial r_n}{\partial r} \end{bmatrix} = -2k \frac{r}{r_n} \begin{bmatrix} d_n \cdot \hat{r} / r - 1 \\ d_n \cdot \hat{r} \cdot \cos \\ d_n \cdot \hat{r} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{\partial \ln A_n}{\partial r} \\ \frac{\partial \ln A_n}{\partial r} \\ \frac{\partial \ln A_n}{\partial r} \end{bmatrix} &= \frac{2}{F(n)} \cdot \frac{\partial F}{\partial (\cos \theta)} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial (\hat{r} \cdot \hat{r}_n)}{\partial r} \\ \frac{\partial (\hat{r} \cdot \hat{r}_n)}{\partial r} \\ \frac{\partial (\hat{r} \cdot \hat{r}_n)}{\partial r} \end{bmatrix} \\ &+ 2 \left\{ \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{1}{r_n} \begin{bmatrix} \frac{\partial r_n}{\partial r} \\ \frac{\partial r_n}{\partial r} \\ \frac{\partial r_n}{\partial r} \end{bmatrix} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{2}{r_n} \left[ \frac{r}{r_n} - \frac{1}{F(n)} \cdot \frac{\partial F}{\partial (\cos \theta)} \right] \\ &\quad \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ \cos \theta \cdot d_n \cdot \hat{r} \\ d_n \cdot \hat{r} \end{bmatrix} + \frac{r^2 + r \cdot d_n \cdot \hat{r}}{r \cdot r_n^2} \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

考虑远场情形, 当  $r \gg r_n$  时, 目标处于雷达照射的远场, 此时  $n \approx 0, r_n/r \approx 1, A_n \approx 1, r - r_n \approx d_n \cdot \hat{r} \ll r$ , 因此, 有:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \end{bmatrix} &= -2k \begin{bmatrix} -1 \\ \cos \theta \cdot d_n \cdot \hat{r} \\ d_n \cdot \hat{r} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{\partial \ln A_n}{\partial r} \\ \frac{\partial \ln A_n}{\partial r} \\ \frac{\partial \ln A_n}{\partial r} \end{bmatrix} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

将式(11)代入式(8)中, 并令极化旋转角  $\theta_x = 0$ , 收发极化对为:

$$(\mathbf{h}^r, \mathbf{h}^i) = \left\{ (\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j) \mid i, j = 1, 2, \mathbf{h}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{h}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right\} \quad (12)$$

则式(7)的角闪烁便可简化为:

$$\begin{aligned} e &= \frac{U_N \frac{\partial S_n^{\text{Im}}}{\partial r} - V_N \frac{\partial S_n^{\text{Re}}}{\partial r}}{U_N \frac{\partial S_n^{\text{Im}}}{\partial r} - V_N \frac{\partial S_n^{\text{Re}}}{\partial r}} \\ &= - \frac{U_N \frac{\partial S_n^{\text{Im}}}{\partial r} \cdot d_n \cdot \hat{r} + V_N \frac{\partial S_n^{\text{Re}}}{\partial r} \cdot d_n \cdot \hat{r}}{U_N^2 + V_N^2} \\ e &= \frac{1}{\cos \theta} \cdot \frac{U_N \frac{\partial S_n^{\text{Im}}}{\partial r} - V_N \frac{\partial S_n^{\text{Re}}}{\partial r}}{U_N \frac{\partial S_n^{\text{Im}}}{\partial r} - V_N \frac{\partial S_n^{\text{Re}}}{\partial r}} \\ &= - \frac{U_N \frac{\partial S_n^{\text{Im}}}{\partial r} \cdot d_n \cdot \hat{r} + V_N \frac{\partial S_n^{\text{Re}}}{\partial r} \cdot d_n \cdot \hat{r}}{U_N^2 + V_N^2} \end{aligned} \quad (13)$$

其中, 符号  $[S]_{ij}$  表示矩阵  $S$  的第  $i$  行第  $j$  列元素;  $U_N, V_N, [S_n^{\text{Re}}]_{ij}, [S_n^{\text{Im}}]_{ij}$  也退化为如下的远场形式:

$$\begin{aligned} S(r, \theta, \phi, k) &= S_n \exp(2jkd_n \cdot \hat{r}) \\ &\quad \exp(-2jkr) \end{aligned} \quad (14)$$

除  $S$  的定义有别外, 式(13)与文献[1]中的(4-80a)、(4-80b)是完全一致的, 可见, 文献[1]中的公式只是式(7)在远场的特例. 由于式(7)是通过求相位函数空间导数的精确求解所得, 下文称之为严格解析式, 它并不包含远场假设, 因而可适用于第2节假设成立的任何距离范围.

#### 4 末制导距离范围内的简化

式(7)作为角闪烁的计算公式, 形式过于复杂, 本节结合考虑末制导雷达的作用范围, 对式(7)作一定的

简化. 考虑到导引头雷达的盲距, 我们可将距离限制在如下范围:

$$d_{\max}/ < r < 2 \cdot d_{\max}/ \quad (15)$$

其中, 为半功率波束宽度, 单位取弧度;  $d_{\max}/ < r$  的含义是目标张角小于主瓣波束宽度. 这样, 在式(15)所限制的距离范围内, 目标虽然不满足远场条件, 但却不会超出主瓣波束之外, 因此分析中主要考虑主瓣波束.

对于主瓣波束, 工程分析中经常采用如下形式的方向图来近似:

$$F(\ ) = \cos^q \quad (16)$$

其中,  $q = \log(1/\sqrt{2})/\log(1/2)$ . 将  $F(\ )$  及其导数代入式(10), 可得:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \ln A_n}{\partial r} \\ \frac{\partial \ln A_n}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \ln A_n}{\partial \phi} \end{bmatrix} = \frac{2}{r_n} \left( \frac{r}{r_n} - \frac{q}{\cos \theta_n} \right) \begin{bmatrix} -1 \\ \cos \theta_n \cdot \hat{d}_n \cdot \hat{r} \\ \hat{d}_n \cdot \hat{r} \end{bmatrix} + \frac{r_n^2 + r \cdot \hat{d}_n \cdot \hat{r}}{r \cdot r_n^2} \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

对导引头雷达而言, 为了获得良好的角度分辨率, 一般较小(2~6度), 此时可认为  $q \gg 1$  且  $r > d_{\max}/ \gg d_{\max}$ . 比如当  $\theta = 0.0873$  (5度) 时,  $q \approx 370$ ;  $r > 11.5 d_{\max}$ . 对第  $n$  个散射点而言, 根据三角形关系, 有:

$$1 - \hat{d}_n / r \approx r_n / r \approx 1 + \hat{d}_n / r$$

因而:  $r/r_n \approx 1 \ll q$ , 故式(17)可简化为:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \ln A_n}{\partial r} \\ \frac{\partial \ln A_n}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \ln A_n}{\partial \phi} \end{bmatrix} = \frac{2q}{r_n \cos \theta_n} \begin{bmatrix} -1 \\ \cos \theta_n \cdot \hat{d}_n \cdot \hat{r} \\ \hat{d}_n \cdot \hat{r} \end{bmatrix} \quad (18)$$

由于  $r/r_n \approx 1$  且  $\hat{d}_n \cdot \hat{r} \ll r$  仍成立, 因而  $\partial \ln A_n / \partial r$  式仍可采用式(11)来近似. 对比式(18)与式(11)中的  $\partial \ln A_n / \partial r$ , 在所考虑的距离范围内,  $q/(r_n \cos \theta_n) \ll k$  成立, 可见, 由幅度  $A_n$  引起的相位梯度远小于由相位  $\theta_n$  所引起的相位梯度. 因而, 计算中可忽略  $A_n$  所导致的相位梯度, 从而将式(11)代入式(7), 得到如下近似:

$$\begin{aligned} e &= - \frac{(\mathbf{R}h^r)^T \left( U_N S_n^{\text{Re}} \cdot \hat{d}_n \cdot \hat{r} + V_N S_n^{\text{Im}} \cdot \hat{d}_n \cdot \hat{r} \right) \mathbf{R}h^i}{U_N^2 + V_N^2} \\ &= - \frac{(\mathbf{R}h^r)^T \left( U_N S_n^{\text{Re}} \cdot \hat{d}_n \cdot \hat{r} + V_N S_n^{\text{Im}} \cdot \hat{d}_n \cdot \hat{r} \right) \mathbf{R}h^i}{|(\mathbf{R}h^r)^T \mathbf{S} \cdot \mathbf{R}h^i|^2} \\ e &= - \frac{(\mathbf{R}h^r)^T \left( U_N S_n^{\text{Re}} \cdot \hat{d}_n \cdot \hat{r} + V_N S_n^{\text{Im}} \cdot \hat{d}_n \cdot \hat{r} \right) \mathbf{R}h^i}{U_N^2 + V_N^2} \\ &= - \frac{(\mathbf{R}h^r)^T \left( U_N S_n^{\text{Re}} \cdot \hat{d}_n \cdot \hat{r} + V_N S_n^{\text{Im}} \cdot \hat{d}_n \cdot \hat{r} \right) \mathbf{R}h^i}{|(\mathbf{R}h^r)^T \mathbf{S} \cdot \mathbf{R}h^i|^2} \end{aligned} \quad (19)$$

关于式(19)需作几点说明:

(1) 尽管(19)、(13)同样都是基于式(11)的导数近似后所得, 但含义有所不同; 远场条件下式(11)近似是非常准确的; 而式(19)在所考虑的距离范围内近似是有一定误差的.

(2) 式(19)中的散射矩阵  $S$ 、 $S_n^{\text{Re}}$ 、 $S_n^{\text{Im}}$  以及  $U_N$ 、 $V_N$  均为近场定义, 而式(13)中则为远场定义, 它可视作式(19)的远场近似; 这样, 只要将文献[1]中的相关参数换成近场形式, 就可推广应用到一定的近场范围内.

(3) 式(19)中, 分母  $|(\mathbf{R}h^r)^T \mathbf{S} \cdot \mathbf{R}h^i|^2$  即目标近场 RCS<sup>[9]</sup>.

## 5 仿真验证

下面以 F18 的角闪烁计算为例, 来比较式(7)的严格解析式与式(19)的近似式之间的误差. 距离范围设定为  $100\text{m} < r < 16000\text{m}$ , 半功率波束宽度  $\theta = 5^\circ$ , 极化旋转角  $\phi = 0$ , F18 的散射中心模型按照文献[10]的方法获取.

定义百分比近似误差  $E$  为:

$$E = 100 \times \left| \frac{\sqrt{e_2^2 + e_1^2} - \sqrt{e_1^2 + e_2^2}}{\sqrt{e_1^2 + e_2^2}} \right| \quad (20)$$

其中,  $e_1$ 、 $e_2$  为采用式(7)计算的角闪烁; 而  $e_2$ 、 $e_1$  为采用式(19)计算的角闪烁.

图2表示了特定姿态下采用式(7)和式(19)所计算的角闪烁与距离的关系; 而图3则给出了各个极化收发对下角闪烁近似误差  $E$  随距离的变化.

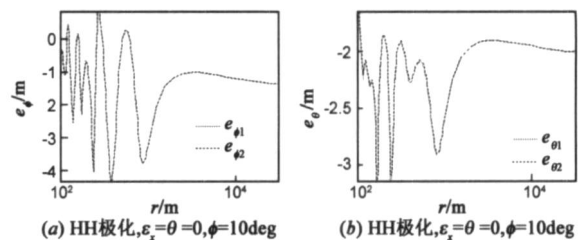


图2 近场角闪烁随距离的变化

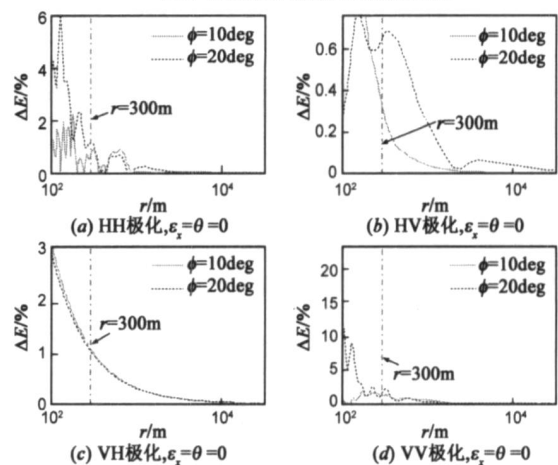


图3 近似误差  $\Delta E$  与距离的关系

首先,由图 2 可见,不同与远场角闪烁,近场角闪烁除了与入射方位角有关外,随着距离变化有很大的起伏,特别是在近距,随着距离  $r$  的增大,逐渐趋于远场值而成为与距离无关的特征量;此外,在考虑的距离范围内,两种计算方法的结果几乎重合,证明了近似公式的有效性。

图 3 更加明确的表示了近似误差。在  $r > 300\text{m}$  时,采用近似公式的近似误差小于 1%,随着  $r$  的增大,误差趋近于 0;但是当  $100\text{m} < r < 300\text{m}$  时,所仿真的姿态条件下误差最大可达 10%,随着  $r$  的进一步减小,预期的近似误差将会更大,但此时早已进入雷达导引头盲距范围。

## 6 结论

本文针对近场角闪烁的计算问题,从理论上严格推导了相位梯度法计算角闪烁的解析式,所得公式同样可适用于远场角闪烁的计算。理论分析证明,文献[1]的角闪烁计算公式仅是本文所得公式在特定极化方式下的远场近似。随后针对末制导问题,分析证明了在一定距离范围内可以忽略幅度给相位梯度造成的影响,并给出了相应的近似公式。这些结果为近场角闪烁预估及其特性研究提供了理论依据。

**致谢:**感谢周剑雄为本文工作所提供的散射中心数据以及胡磊对文稿的编排工作;同时感谢审稿专家提出的宝贵意见。

## 参考文献:

- [1] 黄培康,林桂森,等. 雷达目标特征信号[M]. 北京:宇航工业出版社,1993.
- [2] 殷红成,邓书辉,阮颖铮,等. 利用后向散射回波相对相位计算角闪烁的条件[J]. 电子学报,1996,24(9):36-40.  
Yin Hong-cheng, Deng Shu-hui, Ruan Ying-zheng, et al. On the conditions for obtaining angular glint by backscattering echo relative phase [J]. Acta Electronica Sinica, 1996, 24(9): 36-40. (in Chinese)
- [3] Bilik I, Tabrikian J. Target tracking in glint noise environment using nonlinear non-Gaussian Kalman filter [A]. In Proc. of 2006 IEEE Radar Conf. [C]. Verona, NY, USA: IEEE Press, 2006. 282-287.
- [4] Chang D C, Wu W R. Feedback median filter for robust pre-processing of glint noise [J]. IEEE Trans. on AES, 2000, 36(4): 1026-1035.
- [5] Hughes E J, Leyland M. Target manoeuvre detection using radar glint [J]. Electronics Letters, 1998, 34(17): 1695-1696.
- [6] Jeng S K. Near-field scattering by physical theory of diffraction and shooting and bouncing rays [J]. IEEE Trans. on AP, 1998,

46(4): 551-558.

- [7] 李向军,李静. 复杂目标近区 RCS 的一种计算方法[J]. 制导与引信, 2005, 26(3): 47-51.  
Li Xiang-jun, Li Jing. An algorithm of near field RCS of complex objects [J]. Guidance & Fuze, 2005, 26(3): 47-51. (in Chinese)
- [8] Bhalla R, Ling H. Near-field signature prediction using far-field scattering centers extracted from the shooting and bouncing ray technique [J]. IEEE Trans. on AP, 2000, 48(2): 337-338.
- [9] Taylor J M, Terzuoli A J. On the concept of near field radar cross section [A]. In Proc. of IEEE AP Society International Symposium [C]. Montreal Que., Canada: 1997. 1172-1175.
- [10] 周剑雄. 光学区雷达目标三维散射中心重构理论与技术[D]. 湖南长沙:国防科学技术大学, 2006, 4.  
Zhou Jian-xiong. Theory and Technology on Reconstructing 3D Scattering Centers of Radar Targets in Optical Region [D]. Changsha, Hunan: National University of Defense Technology of China, 2006, 4. (in Chinese)

## 作者简介:



**范红旗** 男, 讲师, 博士, 1978 年 10 月出生于陕西合阳。2001 年毕业于清华大学机械工程系, 获工学学士学位。2008 年 12 月毕业于国防科技大学, 获工学博士学位。现于国防科大 ATR 重点实验室从事自动目标识别与模糊工程、制导雷达信号处理、目标跟踪、嵌入式信号处理系统等方面研究工作。近年来获得国家科技进步奖二等奖和省部级奖励各 1 项。

E-mail: fanhongqi@tsinghua.org.cn



**王胜** 男, 1965 年出生于吉林长春。1987 年毕业于国防科技大学电子技术系, 获工学学士学位。2002 年 12 月毕业于国防科大 ATR 重点实验室获硕士学位, 现为国防科大 ATR 重点实验室博士生, 主要从事雷达信号模拟与识别和电路系统设计方面的研究。

E-mail: snakerws2002@yahoo.com.cn



**祝依龙** 男, 1983 年 1 月出生于安徽贵池。2004 年 6 月和 2006 年 12 月分别在东南大学和国防科技大学获得工学学士和工学硕士学位。现为国防科技大学 ATR 重点实验室博士研究生, 主要从事机动目标跟踪和信息融合方面的研究。

E-mail: yilongzhu@gmail.com

**付强** 男, 1962 年 6 月出生于湖南长沙。教授, 博士生导师。1983、2004 年在国防科大分别获得工学学士和工学博士学位, 现于国防科大 ATR 实验室从事雷达信号处理、目标识别以及精确制导等方面的研究工作。近年来获国家科技进步二等奖 2 项, 在国内外发表学术论文 60 余篇。E-mail: fuqiang1962@vip.sina.com