复杂目标可视化角闪烁偏差计算

方 宁 宁焕生 王宝发

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 角闪烁偏差是雷达跟踪扩展目标时误差产生的重要来源之一,在实际跟踪和制导中,常由于目标回波信号的角闪烁偏差而致使脱靶率大大增加,因此对角闪烁偏差的研究将有助于提高跟踪目标的准确率. 在基于可视化电磁计算系统(GRECO)上,用屏幕上的每个像素代表目标的一个散射中心,将目标的散射中心的数量提高到像素级上,再利用相位梯度方法完成目标的角闪烁计算,进而提高了计算精度. 选用了两球标准体进行角闪烁校模,计算结果与测量结果一致,证明了此方法的准确性. 在此基础上进行复杂目标的角闪烁计算,实现了复杂目标可视化角闪烁计算系统,并分析了导弹靶标由于目标角闪烁影响而导致的脱靶概率.

关 键 词: 雷达目标; 电磁散射; 角闪烁偏差

中图分类号: TN 98

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)02-0186-04

Visual computation of glint error for complex targets

Fang Ning Ning Huansheng Wang Baofa

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The glint error is one of the important error sources in radar tracking on extended target. In practise, the lose-possibility has been risen greatly in teams of the glint error of the scattering wave in radar tracing and guiding system. So the research of glint error can improve the accuracy of tracing target. The visual method was developed to compute the glint error of complex targets by the phase gradient method in GRECO (graphical electromagnetic computing) system in high frequency region. This method made each pixel of screen as one scatter center of target and the number of scatter centers was greatly increased to the pixel level, then the result accuracy was improved and the visual computation course was implemented. The glint result of the two-ball target model was compared with the measured result and proved its validity. Meanwhile, the complex target glint was also proposed in this visual platform. And, the lose-possibility of an traced missile was also given.

Key words: radar target; electromagnetic scatter; glint error

目标角闪烁(Glint)[1,2]表征了目标自身一种固有属性,是目标本身具有的特征信息,因此它也可用来研究目标识别问题. 对目标角闪烁特性研究、抑制、增强等技术已成为电子对抗与反对抗、目标隐身与反隐身、目标识别等应用领域中一个很有意义、很有前景的研究方向.

目标角闪烁是由于扩展目标中各散射部件间的相互影响而引起的在目标角度测量上的固有误差. 在研究复杂目标近区电磁特性时,角闪烁和雷达散射截面具有同等重要性. 目标角闪烁是限制跟踪雷达,尤其是近距离跟踪雷达的角跟踪精度的主要因素,应用中如果对角闪烁处理不当还会增大雷达跟踪目标的误差,甚至会丢失目标,产生严重后果.

一般来说,具有两个或两个以上的等效散射中心的任何体目标都会存在角闪烁偏差,对角闪烁机理的解释有两种物理概念:相位畸变概念和能流倾斜概念. 波前畸变理论常用于测相系统中测量角闪烁,能流倾斜理论则常用于角闪烁的理论计算[3],通过计算散射场的能流密度可计算角

收稿日期: 2004-12-22

作者简介: 方 宁(1979 -),女,辽宁鞍山人,博士生, fangn31@163.com.

闪烁[4~6]. 值得注意的是尽管两种表述不一样,但在各向同性媒质中,当满足几何光学条件近似时,它们是统一的. 即目标的角闪烁既可认为是由目标的扩展所引起的波因廷矢量与其径向分量的偏离,又可认为是由扩展目标的回波信号波前畸变而导致的波阵面法向的倾斜.

本文利用 GRECO(Graphical Electromagnetic Computing)计算系统,首先求出目标的散射场的幅度和相位,再进一步利用 Glint 的计算公式求解标准体的角闪烁并进行校模,然后推广到求解飞行器类复杂目标的角闪烁.

1　Glint 理论计算方法

角闪烁的计算方法一般有两种:相位梯度法和波因廷矢量法,这两种方法是互相等价的[3]. 本文采用相位梯度法计算目标的角闪烁.

由任意散射中心构成的 n 点目标模型,如图 1 所示,假定观察距离 $R \gg d_i$ 和 $R \gg \lambda$,且目标总尺寸远大于 λ,即目标处于光学区. 到达 O 处的雷达入射波可以近似看成是平面波,略去时谐因子 $\exp(\mathrm{j}wt)$,则观察点 O 处的回波信号为

$$E_s = \sum_{i=1}^{n} E_i \exp[-\mathrm{j}(2kR_i - \delta_i)] \qquad (1)$$

式中,$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数;E_i 和 δ_i 分别是第 i 个散射中心的幅度和初始相位.

对 R_i 可作如下近似:

$$R_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \gg R - (z_i\sin\theta\cos\phi + x_i\sin\theta\sin\phi + y_i\cos\theta) \qquad (2)$$

由式(1)和(2),可得

$$E_s \approx \exp(-\mathrm{j}2kR) \sum_{i=1}^{n} E_i \exp(\mathrm{j}\psi_i) \qquad (3)$$

式中 $\psi_i = 2k(z_i\sin\theta\cos\phi + x_i\sin\theta\sin\phi + y_i\cos\theta) + \delta_i$

相位函数可以从式(3)得到,为

$$\Phi(R,\theta,\phi) = \arg E_s = -2kR + \arctan\frac{V_n}{U_n} \qquad (4)$$

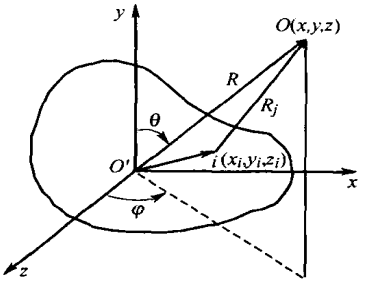


图 1　n 点目标模型

式中 $U_n = \sum_{i=1}^{n} E_i\cos\psi_i = \sum_{i=1}^{n} U_i$

$V_n = \sum_{i=1}^{n} E_i\sin\psi_i = \sum_{i=1}^{n} V_i$

由角闪烁线偏差的计算公式,可计算出 θ 和 ϕ 方向的线偏差为

$$e_\theta = \frac{R\Phi_\theta}{\Phi_r} = \frac{\frac{\partial\Phi}{\partial\theta}}{\frac{\partial\Phi}{\partial R}} = \frac{U_n\sum_{i=1}^{n} f_iU_i + V_n\sum_{i=1}^{n} f_iV_i}{U_n^2 + V_n^2} \qquad (5)$$

$$e_\phi = \frac{R\Phi_\phi}{\Phi_r} = \frac{1}{\sin\theta}\frac{\frac{\partial\Phi}{\partial\phi}}{\frac{\partial\Phi}{\partial R}} = \frac{U_n\sum_{i=1}^{n} g_iU_i + V_n\sum_{i=1}^{n} g_iV_i}{U_n^2 + V_n^2} \qquad (6)$$

式中 $f_i = z_i\cos\theta\cos\phi + x_i\cos\theta\sin\phi - y_i\sin\theta$

$g_i = -z_i\sin\phi + x_i\cos\phi$

当观察点位于 x 轴上,即 $\theta = \frac{\pi}{2}$(y 方向),$\phi = 0$(x 方向),可得

$$e_y = \frac{U_n\sum_{i=1}^{n}(-y_iU_i) + V_n\sum_{i=1}^{n}(-y_iV_i)}{U_n^2 + V_n^2} \qquad (7)$$

$$e_x = \frac{U_n\sum_{i=1}^{n} x_iU_i + V_n\sum_{i=1}^{n} x_iV_i}{U_n^2 + V_n^2} \qquad (8)$$

2　可视化计算及校模

2.1　可视化计算

图形电磁计算(GRECO)是一种快速的高频 RCS 预估方法. GRECO 采用物理光学(PO)、物理绕射理论(PTD)、等效电流法(MEC)和阻抗边界条件(IBC)等高频散射理论,利用计算机的三维图形处理功能得到目标的三维图像,实时计算目标的 RCS.

在 GRECO 中目标视点总是设在单站雷达的位置,目标图象仅是处于照明区的目标表面和棱边. 在高频区,目标总散射场是面元散射场 E_s^{po} 和边缘散射场 E_s^{d} 的矢量叠加. 其面元总场的物理光学解[7]可表示为

$$E_s^{po} = -2\mathrm{j}kE_0\frac{e^{-\mathrm{j}kR}}{4\pi R}\int(\hat{n}\times\hat{z})e^{\mathrm{j}2kz}ds \qquad (9)$$

式中,电磁波入射方向为 $-\hat{z}$ 方向,$\hat{n}$ 为表面单位法向矢量;$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为自由空间波数;E_0 为单位幅

度入射场; R 为目标与雷达之间的距离.

边缘的散射场的解可通过等效电流法和物理绕射理论[7]来计算.

$$E_s^d = jk\frac{e^{-jkR}}{4\pi R}\int_l Z_0 I_e \hat{s}\times\hat{s}\times\hat{t} + I_m \hat{s}\times\hat{t} e^{jk\hat{r}\cdot\hat{s}} dl \tag{10}$$

式中, $\hat{t}$ 是沿边缘取向的单位矢量; $\hat{s}$ 是边缘单元到远场观察点方向的单位矢量; $\hat{r}$ 是边缘单元的位置矢量; R 为散射体至远场观察点的距离. 等效电磁流 I_e、I_m 可写为

$$\begin{aligned} I_e &= \frac{j2(\hat{t}\cdot E_0) D_e}{kZ_0 \sin\beta_i \sin\beta_s} \\ I_m &= \frac{j2(\hat{t}\cdot H_0) D_m}{kY_0 \sin\beta_i \sin\beta_s} \end{aligned} \tag{11}$$

式中 β_i、β_s 分别是入射方向、散射方向与 $\hat{t}$ 的夹角; D_e、D_m 是绕射系数; E_0 为单位幅度入射场.

物理光学场与边缘绕射场叠加得到的总散射场可写为

$$E_s = E_s^{po} + E_s^d \tag{12}$$

根据总散射场可以求解目标的 RCS[7], 利用式(7)、式(8)就可以求出水平和垂直方向的角闪烁偏差.

2.2 典型体目标角闪烁计算、校模

所用两球散射模型如图 2 所示, A、B 分别为两球的中心位置, 两球直径分别为 $d_A = 3.75$ cm, $d_B = 5.4$ cm, 两球间距 $d = 0.4$ m, 雷达工作频率为 $f = 10$ GHz, 极化为 HH, 采用本文相位梯度法计算的结果如图 3 所示. 与文献[5]中给出的实验结果(图 4 所示)相比, 符合良好.

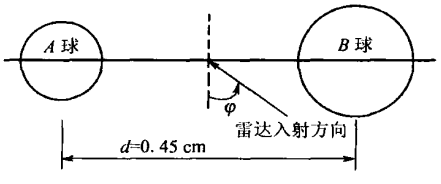


图 2 两球目标模型

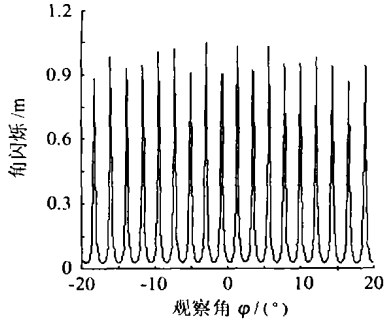


图 3 本文方法计算 Glint 结果

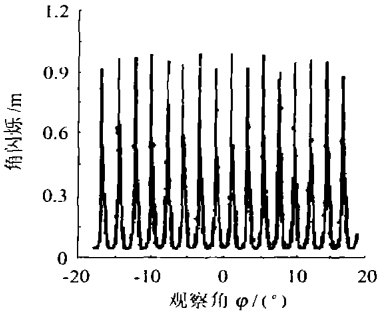


图 4 文献[5]计算结果

从计算结果中可以看出, 角闪烁值偏向球体直径大的一方, 这与物理概念是一致的.

3 复杂目标计算

本文利用文献[8]定义的导弹模型(长 0.99 m、宽 0.635 m、高 0.432 m)(见图 5)进行 RCS 和 Glint 计算, 工作频率为 10 GHz, 极化为 HH. RCS 计算结果见图 6, 水平方向的角闪烁偏差见图 7.

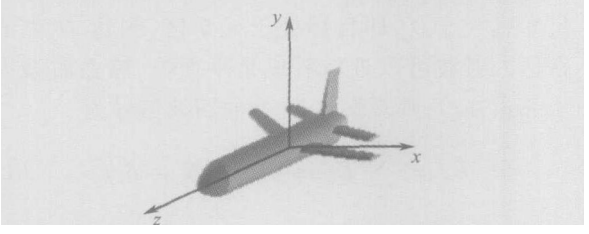


图 5 按文献[8]定义的导弹模型

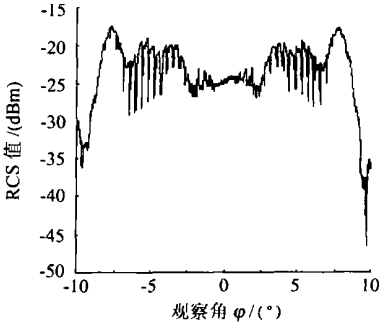


图 6 导弹 RCS 值

从图 6 和图 7 中可看出, 大的角闪烁线偏差(不论正负)区域几乎出现在小的回波 RCS 区域, 反之, RCS 极小值处总会出现大的角闪烁线偏差.

根据图 7 的计算数据画出角闪烁概率密度曲线如图 8 所示, 该分布是典型的高斯分布, 与文献[3]所述一致, 并且大的概率主要出现在目标实际尺寸之内, 角闪烁偏差落在目标之外的概率并不大. 通过分布曲线可计算目标视在中心超出目标实际尺寸的概率即丢失概率: $P = 0.2\%$.

让导弹初始位置旋转 90°, 雷达波入射方向仍

为 - 方向,工作频率为 10 GHz,极化为 HH,范围仍为 - 10°～10°,计算水平方向的角闪烁值. 如图 9 所示,角闪烁概率密度如图10所示. 此时计算丢失概率可为 $P = 18.84\ \%$. 这说明在后一种情况下强散射源更加相对分散和不对称,角闪烁偏差使丢失概率明显增大. 这也是角闪烁对于分析电大尺寸复杂目标和分布式目标特性时显得尤为重要的原因. 对于导弹制导中能否击中目标影响很大.

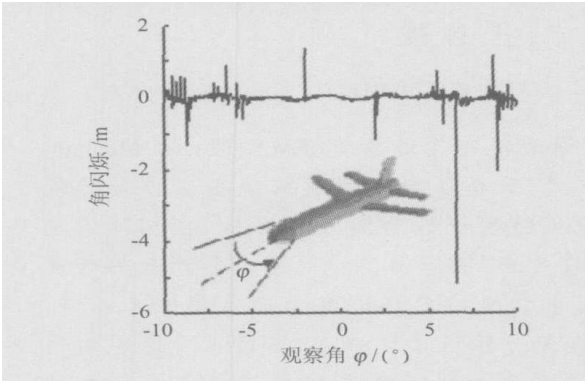


图 7　导弹 Glint 值

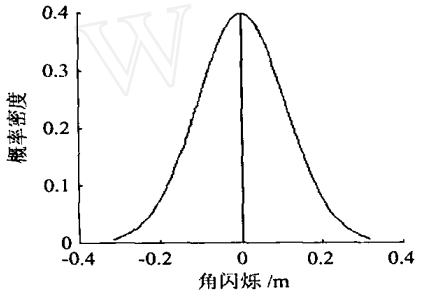


图 8　角闪烁概率密度

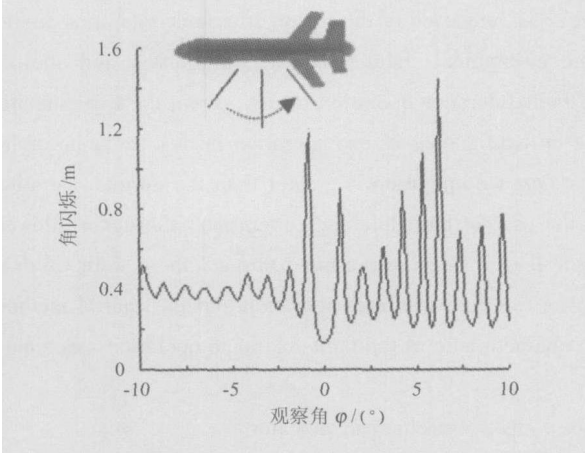


图 9　导弹 Glint 值

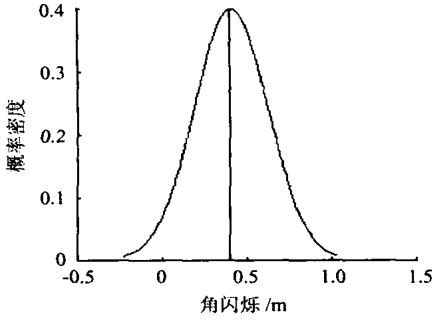


图 10　角闪烁概率密度

4　结束语

角闪烁偏差是雷达跟踪扩展目标时误差产生的重要来源之一,本文在可视化电磁计算系统(GRECO)上,扩展其应用,实现了目标角闪烁偏差的可视化计算. 同时分析了角闪烁产生的原因以及角闪烁和 RCS 之间的规律,大的角闪烁线偏差(不论正负)区域几乎出现在小的回波 RCS 区域,反之,RCS 极小值处总会出现大的角闪烁线偏差,计算结果也表明该方法的有效性和可行性,为减小雷达跟踪目标误差提供强有力的分析工具.

参考文献(References)

[1] Sims R, Graf E. The reduction of radar glint by diversity techniques [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1971, 19(4): 462～468

[2] Howard D D. Radar target angular scintillation in tracking and guidance system based on echo signal phase front distortion [J]. Pro NEC, 1959, 15(15): 840～849

[3] 黄培康. 雷达目标特征信号[M]. 北京:宇航出版社. 1993. 79～15
Huang Peikang. The character signal of radar targets [M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 1993. 79～15 (in Chinese)

[4] Yin H C, Huang P K. Unification and comparison between two concepts of radar target angular glint [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31(2): 778～782

[5] 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 Hongcheng, Deng Shuhui, Ruan Yingzheng, *et al*. On the derivation of angular glint from backscattering measurements of echo relative phase[J]. Acta Electronica Sinica, 1996, 24(9): 36～40 (in Chinese)

[6] Yin H C, Huang P K. Unification and comparison between two concepts of radar target angular glint [J]. IEEE Transcation on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31: 2

[7] 秦德华. 全频段复杂目标电磁散射计算方法研究与应用软件[D]. 北京:北京航空航天大学电子信息工程学院, 2004
Qin Dehua. Study of all-band electromagnetic scatter for complex targets and application software[D]. Beijing: School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004 (in Chinese)

[8] Youssef N N. Radar cross section of complex targets [J]. Proc IEEE, 1989, 77(5): 722～734