

· 天线伺间系统 ·

中图分类号: TN95

文献标志码: A

文章编号: 1004-7859(2012)06-0057-03

# 基于多天线和 RCS 加权雷达角闪烁抑制方法

房志斌, 黄建祥

(北方通用电子科技集团雷达部, 江苏 无锡 214145)

**摘要:** 角闪烁是雷达目标特征的重要方面, 它能严重降低近距离反导雷达的测角精度。文中利用了雷达散射截面和角闪烁之间的相关性抑制角闪烁的加权方法, 为实现这一方法, 采用了空间分集技术来获取目标回波信号的2个或多个独立样本。仿真结果表明, 即使2个天线的处理, 角闪烁线偏差的均方根从3 m降低至1 m。

**关键词:** 超近程雷达; 角跟踪; 角闪烁; 空间分集

## Radar Angle Glint Suppression Method Based on Multi-antenna and RCS Weighting

FANG Zhi-bin, HUANG Jian-xiang

(Department of Radar, Northern General Electric Group Corporation, Wuxi 214145, China)

**Abstract:** Angular glint is an important parameter of radar target characteristics. It seriously reduces angle tracking accuracy of close in antimissile radar. In this paper, the weighting theory that can suppress the angular glint by utilizing the cross correlation between RCS and angular glint is discussed. To accomplish this RCS weighting method, space diversity is employed to get independent samples of target echo signal. The simulation result shows that the square root error value of glint can be suppressed from 3m to about 1m using two antennas.

**Key words:** short-range radar; angular tracking; angular glint; space diversity

## 0 引言

20世纪50年代, 文献[1]提出角闪烁概念, 角闪烁是目标特性, 凡目标尺寸能与波长相比拟, 且具有2个或2个以上等效散射中心的任何扩展目标都会产生角闪烁线偏差, 该线偏差与观测它的雷达距离无关<sup>[2]</sup>。因此, 对于远程雷达来说, 角闪烁噪声所形成的雷达角跟踪误差很小; 但是对于近程雷达, 角闪烁将是角跟踪的主要误差源。

主动防护系统中(超)近程反导雷达一般工作在毫米波段, 对我方重要目标进行保护, 在近程(100 m ~ 50 m)或者超近程(20 m ~ 8 m)对敌方导弹进行拦截。但由于雷达距离目标较近且雷达工作波长较短, 目标带来的角闪烁效应已成为其主要测角误差源, 抑制角闪烁主要的方法有基于雷达体制方面的分集技术和不改变雷达体制的专用跟踪滤波技术, 分集技术主要包括频率分集、空间分集和极化分集, 其中频率分集与动目标显示相结合有一定的困难<sup>[3]</sup>, 接收天线的极化方式毕竟有限。因此, 本文介绍了一种基于空间分集技术的多天线去除接收回波脉冲间相关性的方法, 进一步结合雷达散射截面(RCS)的加权处理, 仿真分析说明此方法能对目标的角闪烁进行有效抑制。

## 1 复杂目标确定性模型

为了进行角闪烁抑制研究, 必须获得目标回波的角闪烁线偏差和RCS样本, 可通过建立目标散射确定性模型来进行仿真计算。从目标特性研究的角度来看, 凡尺寸与波长相比拟, 具有2个或2个以上等效散射中心的任何体目标, 都会产生角闪烁线偏差。对复杂目标机可以将其分为多个等效散射中心。采用矢量叠加的方法, 可算出目标总的散射电磁场。这种复杂目标的确定性计算模型大致分为以下3步<sup>[4]</sup>:

(1) 把目标分解为多个等效的散射中心, 并建立散射中心坐标系和目标坐标系之间的关系;

(2) 将目标坐标系中选定的特定视角和入射电场方向变换到相应散射中心坐标系中, 并计算各部件在散射中心坐标系的散射电磁场;

(3) 将各部件的局部散射电磁场变换到目标坐标系, 并按照各部件的路程差和遮挡关系来进行叠加, 求出的总散射电场  $E_s$  为

$$E_s = \sum_{i=1}^N G_i R_i E_u \exp(-j2k\Delta r_i) \quad (1)$$

式中:  $G_i$  为遮挡因子, 散射点位于可见区时为1, 位于不可见区时为0;  $R_i$  为局部坐标系转换到目标坐标系的旋转矩阵张量;  $\Delta r_i$  为第  $i$  个散射点在目标坐标系中的路程差;  $E_u$  为第  $i$  个散射点在局部坐标系中的散射

电场;  $k$  为波数,  $k=2\pi/\lambda$ 。

然后按照相位梯度法求出三维角闪烁值

$$\nabla \Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \cdot \hat{i}_x + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \cdot \hat{i}_y + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \cdot \hat{i}_z \quad (2)$$

式中:  $\Phi$  为目标回波相位函数。

## 2 角闪烁线偏差与 RCS 的相关性

在这里,由于条件有限,缺乏有效的实测数据对上述方法进行目标分解,因此我们采用参考文献[5]中的多点散射模型。在模型中,认为目标由  $M$  个统计独立的散射中心组成,坐标被限制在一个边长为  $L$  的正方体中均匀分布。散射点的 RCS 在  $[0,1]$  之间随机产生并固定下来,这是因为散射体的 RCS 对方位变化不敏感。 $a_i$  表示第  $i$  个散射中心的 RCS 值,  $\{x_i, y_i, z_i\}$  表示其坐标,目标中心在坐标系原点,雷达观测点在  $xoy$  平面,中心在  $x$  轴,目标绕  $y$  轴从  $z$  轴正向方向向  $z$  轴正向反向旋转,如图 1 所示。则目标回波  $E$  为

$$E = \sum_{i=1}^M a_i \exp \{ j[2kr_i + \phi_i - \omega t] \} = \\ \exp(-j\omega t) \sum_{i=1}^M a_i \exp \{ j[2kr_i + \phi_i] \} = \\ A \exp(-j\omega t) \exp(j\Phi) \quad (3)$$

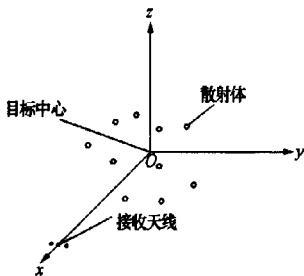


图 1 多点散射模型

式中:  $r_i$  是雷达观测点到第  $i$  个散射体的距离;  $\phi_i$  是第  $i$  个散射体的回波信号初始相位。则回波信号总相位  $\Phi$  为

$$\Phi = \arctan \frac{\sum_{i=1}^M a_i \sin(2kr_i + \phi_i)}{\sum_{i=1}^M a_i \cos(2kr_i + \phi_i)} \quad (4)$$

令  $\Phi_i = 2kr_i + \phi_i$ , 根据式(2)可推出角闪烁线偏差(以  $x$  轴方向为例)

$$g_x = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^M a_i a_l x_i \cos(\Phi_i - \Phi_l)}{\sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^M a_i a_l \cos(\Phi_i - \Phi_l)} \quad (5)$$

在下述计算中如有多个天线,先在各个天线坐标系中求出角闪烁线偏差,然后再变换到统一坐标系中。

我们的仿真条件如下,雷达工作频率为 35 GHz, 目标散射中心个数为 10,  $L=5$  m, 雷达接收天线在  $x$  轴上, 天线距离目标中心为 100 m。表 1 是单个天线  $y$  轴和  $z$  轴角闪烁线偏差  $g_y, g_z$  与 RCS 的相关系数, 由表中可以看出, 角闪烁线偏差与 RCS 之间无相关性, 但是角闪烁线偏差绝对值与 RCS 具有负相关性, 我们可以利用这一点来抑制角闪烁。在仿真中我们还注意到大的角闪烁一般是与小的 RCS 相对应。

表 1 角闪烁线偏差  $g_y, g_z$  与 RCS 的相关系数

$g_y/a$	$g_z/a$	$ g_y /a$	$ g_z /a$
0.017 7	-0.009 8	-0.450 0	-0.365 9

## 3 利用多天线获得信号样本

目标的角闪烁线偏差与目标的姿态角有关, 随着姿态角的变化, 角闪烁线偏差会发生剧烈的变化。我们正是利用这一点, 把多个接收天线放在不同的位置, 那么目标相对每个天线来讲都是不同的姿态角, 每个天线接收到的角闪烁线偏差不相关, 然后变换到统一坐标系中进行处理。

模拟计算是在上述模型中在平面新加入一个接收天线, 图 2 和图 3 为 2 天线角闪烁的相关性, 其中横坐标是 2 天线与目标中心之间的夹角。图 2 为目標长度  $L=5$  m, 图 3 为目標长度  $L=10$  m。

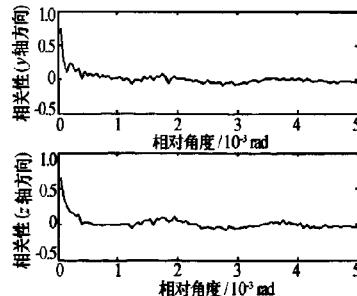


图 2 目標  $L=5$  m 2 天线距离与角闪烁线偏差相关性

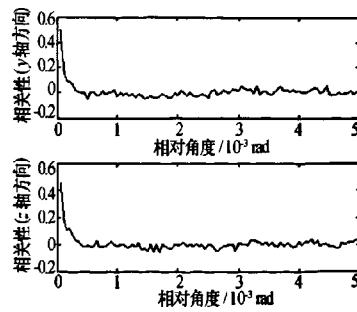


图 3 目標  $L=10$  m 2 天线距离与角闪烁线偏差相关性

从曲线中可以看到, 目標长度为 5 m, 2 天线角闪烁线偏差不相关的临界点在  $6 \times 10^{-4}$  rad, 也就是目标中心距离雷达天线 1 km, 2 天线之间相距 0.6 m(垂直

于目标径向方向)就可以使天线间接收的目标角闪烁线偏差不相关。目标长度为 10 m, 2 天线角闪烁线偏差不相关的临界点在  $4 \times 10^{-4}$  rad。目标中心与雷达天线间距离不变, 目标长度越大, 使得 2 天线角闪烁数据不相关临界点的 2 天线间距就越短。

#### 4 利用 RCS 进行加权处理

角闪烁线偏差绝对值与 RCS 之间存在负相关性, 这说明 RCS 小的地方对应角闪烁线偏差绝对值的概率大, RCS 大的地方对应角闪烁线偏差绝对值的概率小, 那么可以采用 RCS 加权方法抑制目标角闪烁。

设观测雷达天线个数为  $N$ ;  $A_i$  为第  $i$  个天线回波的幅度;  $A_{\max}$  为  $N$  个天线回波的最大幅度;  $W(A_i)$  为幅度加权因子;  $\theta_i$  表示第  $i$  个天线测角结果(已变换到统一坐标系);  $\theta_w$  表示加权后结果。则  $\theta_w$  加权算式如下

$$\theta_w = \left[ \sum_{i=1}^N W(A_i) \theta_i \right] / \left[ \sum_{i=1}^N W(A_i) \right] \quad (6)$$

加权方法有如下几种

$$W(A_i) = 1 \quad (7)$$

$$W(A_i) = A_i / A_{\max} \quad (8)$$

$$W(A_i) = (A_i / A_{\max})^2 \quad (9)$$

$$W(A_i) = (A_i / A_{\max}) \exp \{ [1 - (A_i / A_{\max})^2] / 2 \} \quad (10)$$

$$W(A_i) = [1 / (1 - e)] [1 - \exp(A_i / A_{\max})] \quad (11)$$

$$W(A_i) = [1 / (1 - e^3)] [1 - \exp(3A_i / A_{\max})] \quad (12)$$

$$W(A_i) = [1 / (1 - e^3)] [1 - \exp(5A_i / A_{\max})] \quad (13)$$

$$W(A_i) = \delta(A_i - A_{\max}) \quad (14)$$

第 1 种方法是均匀加权法, 没有用到目标回波幅度, 第 8 种方法选择最大振幅法(SLA), 即用最大 RCS 对应的测角结果来决定目标的位置, 很显然, 这是一种权重最大的方法。

图 4 是天线个数与上述 8 种加权方法的均方根(RMS)误差图, 其中每个天线相距 1 m, 雷达观测点距目标中心 100 m, 横坐标是天线个数。当天线个数是 1 时, 也就是不做任何处理。从图中我们可以看出, 使用多天线能使雷达同时获得目标角闪烁线偏差的多个样本, 进行加权处理后能显著降低目标闪烁线偏差。其中均匀加权效果最差, 在仿真过程中还出现了增加天线但是 RMS 误差反而增大的情况, 这是因为新增加的天线角闪烁比较大, 平均起来使总体 RMS 误差变大。2, 3, 5, 6, 7 加权效果较好, 区别不大, 但是 5, 6, 7 加权方法需要找出最大值, 并且运算较复杂, 平方加权效果比线性加权效果要好。

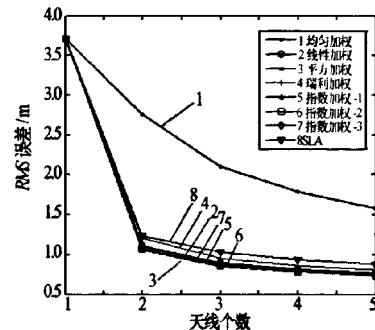


图 4  $L=5$  m 信号样本经过加权的 RMS

从天线个数与角闪烁抑制效果来看, 当天线超过 3 个以上并无多大改善, 因此一般取 2 个~3 个天线的数据就足够了。

#### 5 结束语

在(超)近程反制导雷达中, 目标的角闪烁效应是测角的主要误差。本文首先对目标进行建模, 利用多天线, 获得了目标回波的多个样本, 分析了天线间距与 2 天线角闪烁线偏差的相关性, 可以看出即使天线间距较小, 2 天线角闪烁线偏差的相关性也较低甚至不相关。分析对比了 8 种加权方法的效果及样本个数与加权效果之间的关系。RCS 与闪烁线偏差有负相关性, 采用 RCS 加权的方法, 能对闪烁线进行有效抑制, 仿真分析说明即使采用 2 个天线, 用平方加权能使角闪烁线偏差的 RMS 误差从 3.7 m 降低到 1 m。

#### 参 考 文 献

- [1] Howard D D. Radar target angular scintillation in tracking and guidance system based on echo signal phase front distortion [C]// Proceedings of the National Electronics Conference. Chicago Illinois: IEEE Press, 1959: 840~849.
- [2] 黄培康, 殷红成. 雷达目标特性 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.  
Huang Peikang, Yin Hongcheng. Radar target characteristic [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [3] 茅于海. 频率捷变雷达 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.  
Mao Yuhai. Frequency-agility radar [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1981.
- [4] Qiao X L, Jin M. Angular glint suppression for mm-wave terminal guidance radar based on polarization agility and RCS weighting [C]// Proceedings of the 2001 IEEE Radar Conference. Atlanta, GA: IEEE Press, 2001: 410~414.
- [5] Sandhu G S, Saylor A V. A real-time statistical radar target model [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1985, AES-10(4): 490~507.

房志斌 男, 1977 年生, 高级工程师。研究方向为宽带微波集成电路。

## 雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

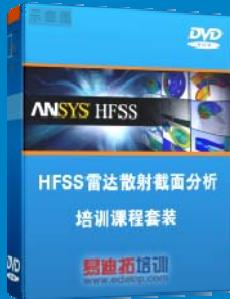
易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS.

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

---

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

---

### ● 更多培训课程：

#### ● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

#### ● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

#### ● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>