

## 雷达目标特征数据库在雷达组网仿真上的应用

曾国奇 苏东林 刘焱

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

**摘要:** 传统雷达组网仿真中, 认为目标为点目标, 目标的 RCS(Radar Cross Section)是一个常数; 实际上目标的 RCS 是随雷达频率、目标相对雷达姿态变化的函数。该文通过对复杂雷达目标进行电磁建模, 计算其在各姿态和各频点的 RCS 数据, 把计算结果存储在数据库中建立雷达目标特征数据库。建立了雷达组网仿真系统, 系统由主控计算机、雷达目标特征数据库、若干雷达站组成。仿真结果表明: 利用雷达目标特征数据库获得雷达在每个时刻观察的 RCS 比传统的把飞行器 RCS 当成常数, 进行雷达组网仿真, 仿真结果更接近实际的情况; 通过多个雷达组成雷达网进行数据融合共同探测目标, 可以大大提高雷达对目标的检测概率。

**关键词:** 雷达组网; 雷达目标特征数据库; 数据融合; 雷达散射截面; 图形电磁计算

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)07-1683-04

## The Application of Radar Target Characteristic Database on The Simulation of Radar Network

Zeng Guo-qi Su Dong-lin Liu Yan

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

**Abstract:** Traditionally, in the simulation of radar network, the aircraft is regarded as a point, whose RCS(Radar Cross Section) is constant; In fact, the RCS is a function of the frequency of radar and the angle between the aircraft and radar. Radar targets characteristic database is created by creating the electromagnetic model of targets, calculating the RCS of the angles and frequencies, storing the data in a database. The radar network simulation system is established composed of center computer, radar targets characteristic database, and several radars. The simulation results indicate that: the results of simulation in which the RCS of aircraft is changed, using the target characteristic database, than fixed, are more creditable; radar network increases the detected probability of radars greatly.

**Key words:** Radar network; Radar target characteristic database; Data fusion; RCS(Radar Cross Section); GRECO(GRaphic Electromagnetic COmputation)

### 1 引言

在现代战争中, 如果能尽早发现敌方的进攻武器, 可以争取宝贵的预警时间, 及时采取措施赢得战争的主动权。目前雷达仍然是主要的远距离探测工具, 随着隐身技术的迅速发展, 飞行器在关键姿态内的 RCS(Radar Cross Section)不断降低, 依靠单个雷达在比较早的时间内发现敌人几乎不可能。通过雷达组网的方式, 在不同的位置布设雷达, 同时观察飞行器的不同姿态, 对各个雷达的数据进行融合, 可以提高对敌方进攻武器的探测能力。

文献[1]采用 OPDL 对雷达网进行建模, 对雷达网在有干扰和无干扰情况下的动态检测性能进行了仿真; 文献[2]对雷达组网中的点迹融合技术和点迹关联技术进行了介绍, 并对点迹融合性能做了定性的研究; 文献[3]对雷达网在电子战条件下跟踪大批次和复杂机动目标能力进行了仿真。但是他们都是基于雷达的最大作用距离已知, 也就是在仿真过程中目

标的 RCS 不变的假设; 而实际上目标的 RCS 是随着姿态角变化的, 即在雷达探测的不同时间点上, 飞行器的 RCS 对应的雷达最大作用距离是变化的。

本文通过建立飞行器的电磁模型, 计算飞行器各个频段和姿态下的 RCS, 建立雷达目标特征数据库。仿真飞行器飞行过程中, 雷达观测到的目标姿态序列, 根据姿态序列, 从雷达目标特征数据库中提取各个姿态和频率下的 RCS 数据, 得到雷达在各个时刻对目标的探测概率。本文在考虑雷达探测期间目标 RCS 不断变化的情况下, 采用 3 部雷达进行组网对某飞机进行探测的性能进行了仿真。

### 2 雷达目标特征数据库的建立

#### 2.1 飞行器电磁模型的建立

为了计算目标的雷达特性, 需要建立能够准确描述其几何特征的三维离散数学模型。飞行器机身或机翼剖面无论多么复杂, 都可以分解为一些曲线段, 这些曲线段所代表曲线的各参数或者在设计时早已给定, 或者由图片信息拟合获

得。建立飞行器离散网格模型，第 1 步是获得飞行器所有剖面曲线段的参数方程；第 2 步是根据照射目标的雷达工作波长，确定各个剖面离散结点的个数，进行网格划分及插值计算<sup>[4]</sup>。

2.2 RCS 计算模型

利用 GRECO(GRaphic Electromagnetic COmputation) 技术对目标的 RCS 进行计算。目标在高频近似条件下，根据散射机理可以分为面元散射，棱边散射和角反射器的散射等。

2.2.1 面元散射模型 根据物理光学法，全金属后向RCS在高频条件下的计算公式为<sup>[5]</sup>

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_s \cos\theta e^{2jkz} ds \right|^2 \quad (1)$$

$\theta$  是面元法向量与入射方向之间的夹角， $z$  是面元  $ds$  到观察点的距离， $ds$  是照亮区的面积。

目标的图像为目标三维表面在计算机屏幕上的投影，因为在计算机屏幕上的积分  $ds'$  (即一像素点)，可表示为  $ds' = \cos\theta ds$ 。

最后得到全金属面元RCS计算公式为<sup>[6]</sup>

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{pixel} \sin c(Kl \tan\theta) e^{2jkz} \right|^2 \quad (2)$$

2.2.2 棱边的散射模型 棱边的计算采用等效电磁流(MEC)方法。

根据高频理论，棱边产生的远区散射场可看成是其上一等效电流的辐射。此电流大小由入射方向和观察点相对棱边的方向来决定。等效电流通常表示为一些增量长度绕射系数的函数。

由等效电流计算棱边远区单站散射场，可表示为<sup>[7]</sup>

$$\mathbf{E}^r = E_0 \frac{e^{-jKr}}{2\pi r} \int_{edge} \left[ -D_{\parallel} \sin\gamma \hat{e}_{\parallel}^i - D_x \cos\gamma \hat{e}_{\parallel}^i - D_{\perp} \cos\gamma \hat{e}_{\perp}^i \right] \cdot e^{2jKZ} dl' \quad (3)$$

其中线积分沿着入射波照亮的棱边进行， $\hat{e}_{\parallel}^i$ 和 $\hat{e}_{\perp}^i$ 是平行和垂直入射面(由入射线和棱边决定)的法向量， $\gamma$ 为入射电场和 $\hat{e}_{\perp}^i$ 的夹角。 $D_{\parallel}, D_x, D_{\perp}$ 为单站增量长度绕射系数。

2.2.3 角反射器的散射计算 角反射器之间的散射主要以面元之间的两次散射为主。采用射线追踪的方法来计算不同像素代表的面元之间的散射，如图 1 所示。

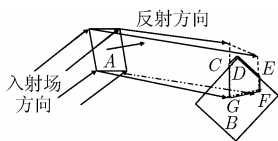


图 1 两个面元之间构成的多次散射

多边形(CDEFG)是入射场从面A到面B上的投影。根据 PO理论，虚拟多边形的RCS可以表示为<sup>[8]</sup>

$$\sqrt{\sigma} = \frac{\hat{n} \cdot \hat{e}_r \times \mathbf{h}_i}{\sqrt{\pi T}} e^{jK\mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{W}} \sum_{m=1}^M \mathbf{p} \cdot \mathbf{a}_m \cdot e^{jK\mathbf{R}_m \cdot \mathbf{W}} \frac{\sin\left(\frac{1}{2}K\mathbf{a}_m \cdot \mathbf{W}\right)}{\frac{1}{2}K\mathbf{a}_m \cdot \mathbf{W}} \quad (4)$$

$\mathbf{h}_i$  入射磁极化单位矢量， $\mathbf{R}_0$  多边形坐标原点位置矢量， $\mathbf{W} = \mathbf{i} - \mathbf{s}$ ， $\mathbf{a}_m$  多边形第  $m$  条边的长度向量； $\mathbf{R}_m$  第  $m$  条边中点的位置矢量  $\mathbf{p} = \mathbf{n} \times \mathbf{W} / |\mathbf{n} \times \mathbf{W}|$ ； $W$  多边形的数目。

2.2.4 RCS 计算结果 图 2 为吉普车模型在  $f=8\text{GHz}$  下 RCS 计算与微波暗室测量结果。实线表示测量结果，虚线表示计算结果；从图可以看出，基于高频近似的散射模型可以比较准确计算目标的 RCS。

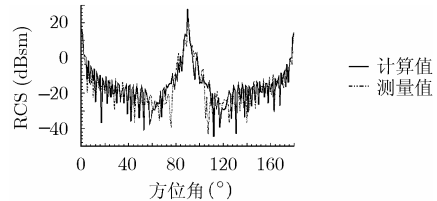


图 2 吉普车模型计算和测量 RCS 比较， $f=8\text{GHz}$

2.3 雷达目标特征数据库的建立

利用 Oracle 作为数据库管理平台，存储目标的特征信息和 RCS 数据，通过 Oracle 提供的连接服务，客户端可以获得特定频率和姿态下的 RCS 信息。由于 Oracle 提供的强大的数据库引擎，事先把 RCS 数据存储在数据库中，网络上提取单个姿态下 RCS 的速度小于 20ms，可以满足实时仿真的需求。

由于 RCS 数据量庞大，通过对每个目标建立一张 RCS 数据表，可以提高数据检索的速度。RCS 数据表结构表 1 所示。

表 1 目标 RCS 表结构

列名	数据类型	说明
ID_RCS	VARCHAR2(30)	序号
FRE_RCS	NUMBER(8, 2)	频率
PITCH_RCS	NUMBER(4, 1)	俯仰角
YAW_RCS	NUMBER(4, 1)	方位角
ROLL_RCS	NUMBER(4, 1)	横滚角
RCS_RCS	NUMBER(8, 6)	RCS 幅度
PHASE_RCS	NUMBER(8, 6)	RCS 相位信息

3 雷达组网仿真系统的建立

3.1 系统的总体结构

如图 3 为雷达组网模拟系统配置图，系统主要由主控计算机，若干雷达站和大型数据库组成。

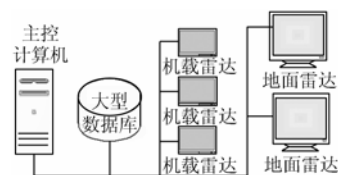


图 3 雷达组网模拟系统配置图

主控计算机：利用 Multigen 和 Vega 处理地图的显示；地面雷达的添加，机上雷达的添加；飞行器的增加，根据特定的航迹进行飞行和显示；把飞行器各个时刻的姿态和位置传给雷达站；把各雷达站实际观测到的飞机点迹进行融合，复现雷达网观测到的飞机航迹。

预警、地面雷达：显示雷达观测到的 RCS 信息；向主控计算机回传雷达看到的点迹信息。

数据库：存储雷达目标的特征信息和 RCS 信息以及各个雷达的参数信息。

### 3.2 目标相对于雷达姿态角度的获得

图 4 中的坐标系  $x_1y_1z_1$  为飞行器机体坐标系，机头沿  $x_1$  方向， $r$  为连接  $o_1o$  的向量， $r'$  为连接  $o_1p$  的向量。在 RCS 计算和暗室测量中：雷达不动，目标旋转，是右手旋转为正；为了满足和静止目标测量的角度定义保持一致，动目标中，通常目标静止，雷达位置绕着目标旋转，因此姿态角的旋转以左手旋为正。方位角为： $\varphi = \arccos(\hat{x}_1 \cdot r')$ ，方向与  $r \cdot y_1$  相反；俯仰角为： $\theta = \arccos(\hat{r} \cdot z_1)$  方向与  $r \cdot z_1$  相同。在求解姿态角度的时候，所有的坐标系统都必须在统一的坐标系下运算。

$$\begin{pmatrix} x_T(t) \\ y_T(t) \\ z_T(t) \end{pmatrix} = C_R^P \cdot \begin{pmatrix} x - x_R(t) \\ y - y_R(t) \\ z - z_R(t) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$(x, y, z)$  为雷达坐标系中任意点坐标， $(x_R(t), y_R(t), z_R(t))$  为目标点在雷达坐标系中的坐标， $(x_T(t), y_T(t), z_T(t))$  为点  $(x, y, z)$  在目标坐标系中的坐标。 $C_R^P$  为从目标位置点的雷达坐标系到目标坐标系的变换矩阵。

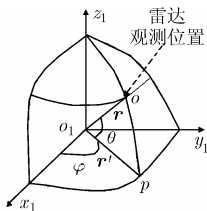


图 4 运动目标姿态角的定义

### 3.3 点迹的融合方法

在雷达组网系统中，点迹融合方式可分为两大类：点迹压缩合并方法和点迹数据串行处理方法。点迹数据压缩合并方法是指将多部雷达在同一时间对同一目标的点迹合并起来，将多个探测数据压缩成一个数据。点迹数据串行处理方法是多雷达数据组合成类似单雷达的探测点迹用于点迹航迹的互联。

在主控计算机上进行飞行器模拟飞行，同时把飞行点迹的数据传给各个雷达站，各个雷达站根据雷达的位置和飞行器的位置，从数据库中获得对应的 RCS 值，根据 RCS 计算出雷达的检测概率，如果检测概率大于某一假定的值，则认为有目标存在，并把对应的飞行器的位置传给主控计算机，主控计算机融合各个雷达站的点迹，获得雷达组网后得到的

点迹，如图 5 所示。

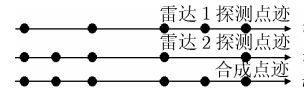


图 5 点迹串行合并方法

### 3.4 仿真数学模型

采用以雷达方程为基础的功能仿真方法。考虑到雷达的实际情况，根据一定恒虚警下接收机的信噪比以及其相应的检测概率来判断目标的有无。

无干扰情形下，对单个脉冲检测雷达输出信噪比为<sup>[9]</sup>

$$SNR = K_r \frac{\sigma F^4(\theta, \varphi)}{R_T^4} \quad (6)$$

式中  $K_r = \frac{P_T G_T^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 FKT B_n L_s}$ ， $P_T$  为雷达发射机功率； $G_T$  为

雷达天线(接收)增益，假设雷达天线的发射和接收增益相等； $\sigma$  为目标的 RCS； $\lambda$  为雷达波长； $R_T$  为雷达和目标的距离； $L_s$  为系统损耗； $F(\theta, \varphi)$  为传播因子。接收机内部噪声功率  $P_n = FKT B_n$ ； $F$  为接收机的噪声系数； $T$  为绝对温度； $K$  为波尔兹曼常数； $B_n$  为接收机等效带宽。

雷达发现目标的概率与雷达检测门限值，虚警概率、雷达接收机的输出信噪比和信号脉冲数等因素有关。

对于单脉冲探测,雷达的探测概率为<sup>[1]</sup>

$$P_d = e^{-h/(1+S/N)} = P_f^{1/(1+S/N)} \quad (7)$$

式中  $h$  为雷达检测门限； $P_f$  为雷达的虚警概率，一般取  $10^{-6}$ ； $S/N$  为雷达接收机的输出信噪比。

## 4 仿真实例

如图 6 所示：某飞机在初始位置为(0,-80km)，高度为 8000m，以 500km/小时往正南方向飞行。3 个雷达同时观测目标，假设雷达始终可以照射到目标，只有当目标的 RCS 大于雷达的观察门限，雷达才能发现目标。3 个雷达的位置分别为：雷达 1 的位置为(0,0)，雷达 2 的位置(40km,-40km)，雷达 3 的位置(-40 km,-60 km)。

雷达为单脉冲雷达，工作频率为 1GHz，发射平均功率  $P_T = 500KW$ ，天线增益  $G = 35dB$ ，接收机噪声系统  $F = 5dB$ ，系统的噪声功率为-140 dB，采用单个脉冲检测目标。

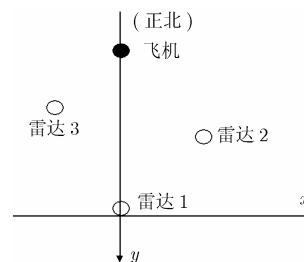


图 6 雷达组网示意图

整个飞行过程中雷达 1 观测到的 RCS 的对数均值为  $-0.94755\text{dBsm}$ , 雷达 2 为  $7.126565\text{dBsm}$ , 雷达 3 为  $9.122207\text{dBsm}$ 。

在图 7 中, 实线表示飞行各个时刻点, 根据雷达 1 实际观测到的 RCS 计算的雷达检测概率曲线; 虚线表示在整个过程中 RCS 为常数  $-0.94755\text{dBsm}$  (为各个时刻点 RCS 的对数平均值) 下雷达的检测概率。图 8, 图 9 与图 7 类似, 分别表示雷达 2 和雷达 3 在定 RCS 和变 RCS 下, 雷达在各个时刻点上的检测概率。

可以看出, 传统的把目标的 RCS 当成常数的雷达组网仿真的方法得出的检测概率与变 RCS 的结果相差很大, 采用变 RCS 的仿真方法可以更接近实际情况。

取 3 部雷达在同一时刻点上的检测概率最大的概率作为融合后的检测概率。图 10 表示采用定 RCS 和变 RCS 后的融合后的检测概率。实线表示变 RCS 融合后的概率, 虚线表示定 RCS 的融合概率, 点画线表示雷达的检测门限。假定雷达的检测概率大于 90% 以上表示雷达可以发现目标。采用变 RCS 进行分析中, 雷达 1 的检测概率为 20%, 雷达 2 的检测概率为 51.5%, 雷达 3 的检测概率为 73%, 融合后的检测概率为 84%。

因此, 通过多个雷达组网的方式, 把各个雷达获得的数据由主控站进行点迹融合, 可以大大提高雷达的检测概率。

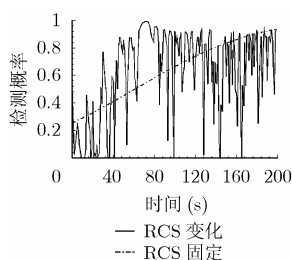


图 7 雷达 1 检测概率比较

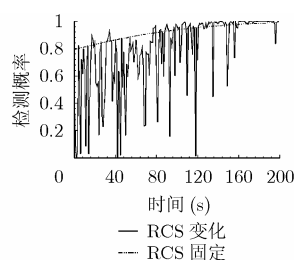


图 8 雷达 2 检测概率比较

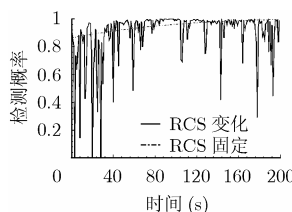


图 9 雷达 3 检测概率比较

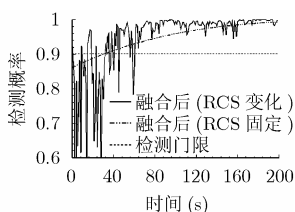


图 10 数据融合后的检测概率

## 5 结束语

通过对复杂目标进行电磁建模, 计算出目标在各姿态和

各频点的 RCS 数据, 把数据存储在数据库中作为雷达目标特征数据库。利用雷达目标特征数据库建立了雷达组网仿真系统。雷达组网仿真实例表明: 利用雷达目标特征数据库获得雷达在每个时刻观察的 RCS 比传统的把飞行器的 RCS 当成常数, 进行雷达组网仿真, 仿真结果更接近实际的情况; 通过多个雷达组成雷达网进行数据融合共同探测目标, 可以大大提高雷达对目标的检测概率。

如果在仿真过程中, 考虑天线的方向图以及采用更加复杂的数据融合算法, 仿真结果将更加接近实际情况。

## 参考文献

- [1] 李强. 基于对象 petri 网的雷达组网系统应用效能研究. 现代防御技术, 2004, 32 (6): 61-64.
- [2] 方青. 雷达组网数据融合处理中的点迹融合技术. 现代电子, 2002, (4): 5-12.
- [3] 罗鹏飞, 张文明, 邹毅智. 组网雷达多目标跟踪仿真系统. 火控雷达技术, 2000, 29 (3): 45-51.
- [4] 刘天舒. 任意雷达目标建模软件的研究与开发. [硕士学位论文], 北京: 北京航空航天大学, 2004.
- [5] Maffet A L. Topics for a Statistical Description of Radar Cross Section. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- [6] Rius J M, Ferrando M, and Jofre L. GRECO: Graphical electromagnetic computing for RCS prediction in real time. *IEEE Antennas Propagation Magazine*, 1993, AP-35(2): 7-17.
- [7] Knott E F, Shaeffer J F, and Tuley M T. Radar Cross Section. America: Artech House, 1985.
- [8] Gordon W B. Far field approximations to the kirchhoff-helmholtz representations of scatter fields. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1975, AP-23(5): 590-592.
- [9] 王国玉, 汪连栋, 阮祥新等. 雷达对抗实验替代等效推算原理与方法. 北京: 国防工业出版社, 2002: 108-109.

曾国奇: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为电磁计算、目标特性、信号处理、计算机仿真。

苏东林: 女, 1960 年生, 教授, 研究方向为目标特性、电磁兼容、天线。

刘 焱: 男, 1974 年生, 博士生, 研究方向为目标识别、信号处理。