

飞机运动特征对雷达检测性能的影响分析

刘万萌, 童创明, 王童, 陈彬

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 仿真分析了超音速隐身飞机的飞行速度对其动态 RCS 序列及雷达检测性能的影响。首先依据空气动力学原理设定飞行航迹, 并考虑实际中随机抖动的影响, 获取时变雷达视线姿态角; 然后应用物理光学并结合等效电磁流的方法, 仿真分析了飞行速度对动态 RCS 序列的影响; 最后基于隐身飞机 RCS 起伏数据, 推导出起伏目标检测概率计算公式, 进一步研究了速度对雷达检测性能的影响, 得出飞行速度越高, 发现概率越低且起伏越剧烈的结论。研究成果可为超音速隐身目标的探测提供依据。

关键词 飞机; 超音速隐身目标; 动态 RCS; 运动特征

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.01.002

中图分类号 V21; TN011 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)01-0007-06

An Analysis of an Influence of Aircraft Movement Feature on Radar Detection Performance

LIU Wanmeng, TONG Chuangming, WANG Tong, CHEN Bin

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: This paper analyzes an influence of speed of the supersonic speed stealth aircraft on dynamic RCS series and radar detection performance. First of all, the paper sets flight tracks in accordance with aerodynamics, and obtains the real-time angles of radar sight with random jitter. Afterwards, the paper analyzes an influence of speed on dynamic RCS series by utilizing physical optics and method of equivalent currents. Finally, based on the stealth aircraft's RCS fluctuating data, the paper deduces the computational formula of detection probability of fluctuating targets, and researches on an influence of speed on radar detection performance. The results show that the greater the speed is, the lower is the probability, and the more severe is the fluctuating detection. This research can provide a support for the detection of supersonic speed stealth target.

Key words: aircraft; supersonic speed stealth target; dynamic RCS; movement feature

雷达散射截面(RCS)是描述雷达目标特性最基本、最重要的参数,其大小与起伏特性会直接影响着雷达探测目标的概率。在实际雷达目标检测中,雷

达与目标之间往往会存在着相对运动,目标雷达散射截面在一段时间内会随着雷达视线角的变化而发生起伏^[1]。

收稿日期: 2016-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(61372033)

作者简介: 刘万萌(1993—),男,山东菏泽人,硕士生,主要从事目标与环境电磁散射研究. E-mail: 18789407671@163.com

通信作者: 童创明(1964—),男,湖北黄冈人,教授,博士生导师,主要从事目标与环境电磁散射研究. E-mail: 18789407671@163.com

引用格式: 刘万萌,童创明,王童,等. 飞机运动特征对雷达检测性能的影响分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(1):7-12. LIU Wanmeng, TONG Chuangming, WANG Tong, et al. An Analysis of an Influence of Aircraft Movement Feature on Radar Detection Performance[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(1): 7-12.

在实际军事斗争中,非合作目标总是处于运动状态,研究目标的动态 RCS 及其起伏特性对雷达探测概率的影响具有重要意义。文献[2]在获得全空域静态 RCS 数据库的基础上,采用线性插值法得到时变姿态角对应的 RCS 值,但仅仅是研究了航路捷径和高度对飞机动态 RCS 的影响,并未分析飞机其他运动特征对动态 RCS 的影响,更没有针对飞机运动特征对雷达目标探测的影响做进一步的分析。文献[3]仅仅是针对 F-117 典型隐身目标采取偏航、俯仰等机动对动态 RCS 特性影响做了一些分析。文献[4]以 RCS 分布模型中的 χ^2 (Chi-square) 分布^[5]为例,研究了目标起伏特性对雷达检测性能的影响。在 RCS 统计分布模型的研究方面,大致可分为 2 个阶段:首先,在第一阶段建立了非起伏模型^[6],并提出以 Swerling 起伏统计模型来描述动态目标的统计性能^[7];然后又提出了卡方分布^{[8]64-82}、对数正态分布^[9]和赖斯分布^[10]3 种统计模型。采用 RCS 统计分布模型,虽然有一定的合理性,但对于 RCS 起伏剧烈的隐身目标,依然不能准确描述其对雷达检测性能的影响。文献[11]以模拟生成的雷达散射截面(RCS)为基础,研究隐身目标检测概率,其结果缺乏真实性。文献[12]以水平急转弯机动和蛇形机动为例,在获取飞机动态 RCS 序列的基础上,利用 Swerling1 分布计算出瞬时检测概率,但并没有分析隐身飞机的飞行速度对雷达检测概率的影响。

飞机隐身研究多从材料入手^[13],随着隐身飞机的飞行速度和机动能力不断提高,已有不少隐身飞机能够实现超音速飞行,然而还未有文献研究超音速隐身飞机飞行速度对其动态 RCS 的影响,进一步分析速度对雷达检测性能影响的文献资料更是少之又少。本文以某型超音速隐身飞机为研究对象,采用准静态法获取目标动态 RCS 序列,仿真分析了飞行速度对动态 RCS 的影响;然后以目标动态 RCS 起伏数据为基础,依据起伏目标的检测原理,进一步分析了目标飞行速度对检测概率的影响,仿真结果为雷达检测超音速隐身目标提供了参考。

1 航迹设定和雷达视线角解算

依据准静态法的基本原理,应用物理光学(PO)并结合等效电磁流(MEC)的方法获取目标动态 RCS 时间序列的具体步骤如下:

1) 依据典型超音速隐身目标的性能参数及空气动力学原理设定飞行航迹;

2) 结合预设飞行航迹,并采用姿态抖动模型修正姿态角,通过机体坐标系与雷达坐标系之间的转

换关系解算出实时雷达视线角;

3) 将获取的实时雷达视线角代入基于物理光学和等效电磁流混合算法所编写的程序,即可获得超音速隐身目标的动态 RCS 时间序列。

1.1 飞行航迹设定

为方便研究超音速隐身目标的飞行速度对其动态 RCS 时间序列及雷达检测性能的影响,本文将飞行航迹设定为侧站定常平飞。侧站定常平飞是飞机最简单的飞行航迹,同时也是研究飞机动态 RCS 特性的常用航迹。在侧站平飞过程中,航迹偏转角保持不变,航迹倾角为零,且速度滚转角也是零^[2]。以雷达所在位置为原点,建立地面雷达坐标系 $O_g X_g Y_g Z_g$,飞机沿 $O_g X_g$ 轴负向做侧站平飞机动,突防起点均选取与雷达站水平距离 $x=100$ km 处。则在雷达坐标系中,依据空气动力学原理可得:

$$\begin{cases} dx_g/dt = V \\ P \cos \alpha = X \\ P \sin \alpha + Z = G \end{cases} \quad (1)$$

式中: V 为飞机侧站平飞速度; P 为发动机推力; G 为飞机重力; α 为迎角; X 和 Z 分别为空气阻力和升力。

对侧站平飞的航迹建模并求解,通过对式(1)计算可求得迎角 $\alpha \approx 5^\circ$,在飞行过程中飞机姿态保持不变。在侧站定常平飞航迹中,选取较为典型的巡航高度 $H=6$ km 和航路捷径 $C_s=40$ km。在以上设定的航迹中,采用准静态法获取超音速隐身目标的速度为 $0.9Ma$ 、 $1.3Ma$ 和 $1.7Ma$ 时的动态 RCS,对比分析不同飞行速度对动态 RCS 序列及雷达检测性能的影响。

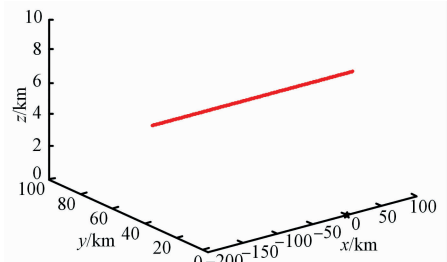


图1 预设飞行航迹

Fig. 1 Track predestining

1.2 姿态角解算和飞行扰动建模

在飞机航迹设定中已经建立了地面雷达坐标系,而目标机体坐标系 $O_T X_T Y_T Z_T$ 是固定于隐身飞机之上。机体中心为原点 O_T ,平行于机身轴线指向机头方向为 $O_T X_T$ 轴, $O_T Z_T$ 轴位于目标对称面内,垂直于 $O_T X_T$ 轴指向上方, $O_T Y_T$ 轴垂直于目标对称平面,由右手螺旋法则确定。飞机按预设航迹快速飞行过程中会引起雷达视线在目标机体坐标系中

不断变化。若求解动态 RCS 时间序列,必须先求解出视线姿态角随时间的变化关系。

空间中任一点 P 在地面雷达坐标系中的坐标为 (x_p, y_p, z_p) , 定义 φ 、 η 和 γ 分别为偏航角、俯仰角和滚转角, 并建立点 P 在雷达坐标系中的坐标与其在机体坐标系中的坐标之间的关系^[1]:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\eta & 0 & -\sin\eta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\eta & 0 & \cos\eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_p - x_T(t) \\ y_p - y_T(t) \\ y_p - z_T(t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $z(t)$ 为点 p 在目标坐标系中的坐标; $x_T(t)$ 、 $y_T(t)$ 、 $z_T(t)$ 为目标在雷达坐标系中的坐标。将雷达所在坐标原点 $(0, 0, 0)$ 代入式(2)即可解出时变的雷达视线姿态角 $\phi(t)$ 和 $\theta(t)$:

$$\phi(t) = \arctan \frac{y(t)}{x(t)} \quad (3)$$

$$\theta(t) = \arccos \frac{z(t)}{\sqrt{x^2(t) + y^2(t) + z^2(t)}} \quad (4)$$

飞机在飞行过程中难以避免风向、气流等自然因素的影响, 会产生随机抖动, 这是一个随机过程, 其最终结果是导致雷达视线角的随机抖动, 因此在解算雷达视线角时叠加随机抖动的影响更加符合实际情况。见图 2。

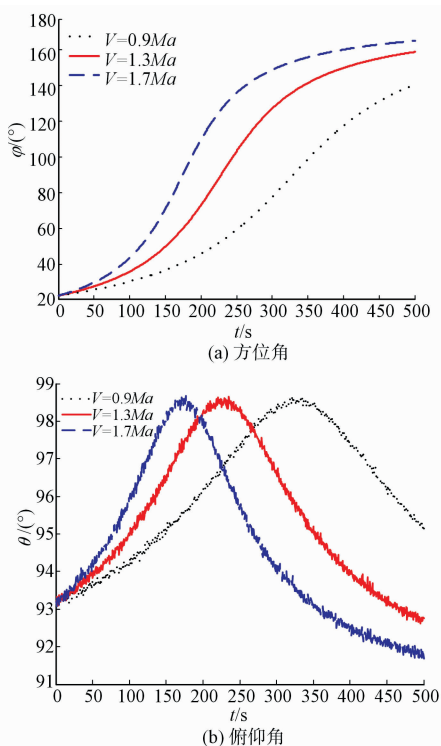


图 2 雷达视线角

Fig. 2 Aspect angles of radar

本文采用如下的随机抖动模型^[15]对这种姿态抖动的影响进行描述:

$$\begin{aligned} \phi_{t+1} &= \phi_{t\rho} + \sqrt{1-\rho} \text{rand}_1(t+1)\sigma_\varphi \\ \theta_{t+1} &= \theta_{t\rho} + \sqrt{1-\rho} \text{rand}_2(t+1)\sigma_\theta \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ϕ_{t+1} 和 θ_{t+1} 分别为 $t+1$ 时刻方位角和俯仰角的扰动量; $\text{rand}(t+1)$ 为服从 $[-1, 1]$ 的正态分布; $\rho = \exp(-\Delta t/T)$, Δt 为取样间隔, T 为飞机扰动周期; σ_ϕ 为方位角扰动方差, σ_θ 为俯仰角扰动方差。抖动模型的参数设置^[15]: $\Delta t = 0.001$ s, $T = 4$ s, $\sigma_\phi = 1.1^\circ$, $\sigma_\theta = 0.5^\circ$ 。

根据设定的航迹, 并叠加随机抖动模型, 可以求解出飞行过程中的实时雷达视线角。

2 动态 RCS 仿真分析

2.1 目标 RCS 计算

以典型隐身飞机全金属几何模型为基础, 采用物理光学和等效电磁流混合方法, 仿真分析 S 波段动态 RCS 特性。

2.1.1 RCS 计算方法

物理光学法(PO)是用散射体表面的感应电流取代散射体本身, 通过对表面感应场的近似和积分而求得散射场, 其出发点是 Stratton-Chu 散射场积分方程。在平面波入射情况下, 物体表面远区散射场可写为^[16-17]:

$$\mathbf{E}_s(\mathbf{r}) = \frac{jk}{4\pi r} \int_S \{ \mathbf{s} \times (\mathbf{M}_s(\mathbf{r}') + \eta_0 \mathbf{s} \times \mathbf{J}_s(\mathbf{r}')) \} \times \exp[jk\mathbf{r}'(\mathbf{s} - \mathbf{i})] d\mathbf{s}' \quad (6)$$

式中: η_0 为自由空间波阻抗; k 为自由空间波数; \mathbf{i} 和 \mathbf{s} 是入射方向和散射方向的单位矢量; S 表示目标表面的照明部分; $\mathbf{J}_s(\mathbf{r}')$ 和 $\mathbf{M}_s(\mathbf{r}')$ 是 S 上的电磁流矢量幅度。 $\mathbf{J}_s(\mathbf{r}')$ 和 $\mathbf{M}_s(\mathbf{r}')$ 在物理光学法假定条件下, 由等效原理可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_s(\mathbf{r}') &= \mathbf{E}(\mathbf{r}') \times \mathbf{n} \\ \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') &= \mathbf{n} \times \mathbf{H}(\mathbf{r}') \end{aligned} \quad (7)$$

式中: \mathbf{n} 代表目标表面法向量; $\mathbf{H}(\mathbf{r}')$ 和 $\mathbf{E}(\mathbf{r}')$ 分别代表目标表面总的磁场与电场。对于理想导体可得下式:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_s(\mathbf{r}') &= 0 \\ \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') &= 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}_i(\mathbf{r}') \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{H}_i(\mathbf{r}')$ 表示目标表面入射场。

等效电磁流法(MEC)是对棱边的绕射计算^[18], 该方法的基本点是假设在围绕奇异性(边缘回路)的各点处存在线电流和线磁流, 并以远场辐射积分的形式对它们求和, 克服了焦散问题。对于边缘为 C

的任意劈边,它的远区边缘绕射场可表示为:

$$\mathbf{E}^d = \frac{jk}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \int_C \left\{ \eta_0 \mathbf{s} \times [\mathbf{s} \times \mathbf{J}(\mathbf{r}')] + \mathbf{s} \times \mathbf{M}(\mathbf{r}') \right\} \times e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} dl \quad (9)$$

式中: \mathbf{s} 表示观察方向的单位矢量; \mathbf{r}' 代表从原点到边缘上某点的径向矢量; dl 是沿 C 的弧长增量。 $\mathbf{J}(\mathbf{r}') = I_e(\mathbf{r}')\mathbf{t}$ 和 $\mathbf{M}(\mathbf{r}') = I_m(\mathbf{r}')\mathbf{t}$ 分别代表等效边缘电流和磁流, \mathbf{t} 表示 C 的切向单位矢量。

2.1.2 算法有效性验证

这里采用等效电磁流梭边修正的物理光学法和商用软件 FEKO 中的快速多极子 (MLFMM) 对隐身飞机模型的后向散射进行计算,图中 0° 对应机头方向,入射波频率为 3 GHz,水平极化,俯仰角定为 90° 。观察图 3 可得,本文所采用的算法与 FEKO 计算结果吻合的很好,证明了该算法的正确性。从 RCS 计算结果可以看出,随着方位角的变化,隐身飞机的 RCS 值起伏较大,最大值和最小值之差达到 60 dB,而且在正前鼻锥方向水平 $\pm 45^\circ$ 和正后方 $\pm 30^\circ$ 范围内 RCS 值普遍较小,其平均值分别为 -16 dB 和 -6 dB,隐身效果较为明显,但超音速隐身飞机的侧向 RCS 值较大。

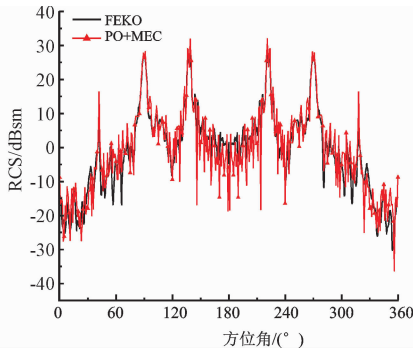


图 3 $f=3$ GHz 时隐身飞机 RCS 特性曲线

Fig. 3 RCS characteristic curve of stealth aircraft of 3 GHz

2.2 动态 RCS 序列仿真

目标动态 RCS 的仿真通常采用“似静法”,即将目标运动轨迹合理的离散为若干采样点,动态 RCS 时间序列由采样点上的 RCS 值组成。隐身飞机沿预设航迹以不同速度飞行时的动态 RCS 时间序列见图 4。

由图 4 可以看出,当隐身飞机飞行速度 $V=1.3Ma$ 时,其动态 RCS 峰值出现在 $200\sim 250$ s 时间段内,即峰值出现时间短于速度 $V=0.9Ma$ 时的情况,且相较于速度 $V=0.9Ma$ 时的动态 RCS,其动态 RCS 序列起伏更加剧烈;当飞行速度 $V=1.7Ma$ 时,只有在 $100\sim 200$ s 时间段内,其 RCS 值比速度 $V=0.9Ma$ 时较大些,其余时间段内均偏小。而且隐身飞机飞行速度越高,其动态 RCS 时间序列起伏

越剧烈。这是因为在侧站定常平飞过程中,只有飞机飞行到雷达站附近时,其侧面才会较多的暴露在雷达探测范围之内。飞机飞行速度越高,则飞机在雷达站附近飞行的时间越短,那么在较长的时间内是机头或机尾方向暴露在雷达探测范围之内,而由图 3 知,超音速隐身飞机在机头和尾部隐身性能较好,其侧向 RCS 较大,因此,飞机的飞行速度会对这段时间内的动态 RCS 序列产生很大的影响。而且飞行速度越高,雷达视线角变化越剧烈,导致 RCS 起伏越剧烈,进而影响雷达目标检测的连续性。

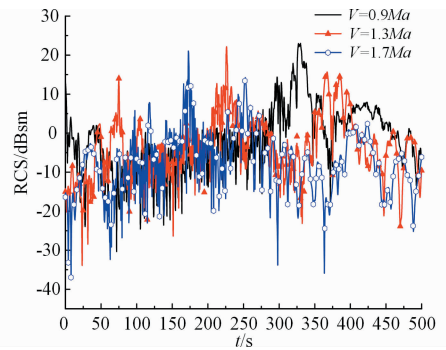


图 4 隐身飞机动态 RCS 序列

Fig. 4 Dynamic RCS series of stealth aircraft

3 雷达检测性能建模与分析

本文以虚警概率和发现概率为标准,以动态 RCS 起伏数据为基础,推导出起伏目标检测概率计算公式,分析典型超音速隐身飞机的速度对雷达检测性能的影响。

3.1 雷达检测性能建模

3.1.1 虚警概率

虚警是指仅有噪声时,噪声电平超过门限值被误认为信号的事件。通常认为加到接收机中频放大器上的噪声是零均值的宽带高斯白噪声,其概率密度函数为:

$$p(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\psi} \exp\left(-\frac{v^2}{2\psi^2}\right) \quad (10)$$

式中: ψ^2 代表方差,可取为 1。宽带高斯白噪声通过窄带中频滤波器后加到包络检波器,输出的噪声包络服从瑞利分布,其电压振幅的概率密度函数为:

$$p(x) = \frac{x}{\psi^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\psi^2}\right), x \geq 0 \quad (11)$$

此处, x 表示检波器输出端噪声包络的振幅值。虚警概率 P_{fa} 即为噪声电压包络超过门限电平 V_T 的概率:

$$P_{fa} = \int_{V_T}^{\infty} P(x) dx = \exp\left(-\frac{V_T^2}{2\psi^2}\right) \quad (12)$$

可以通过虚警概率求得门限电平 V_T :

$$V_T = \sqrt{-2\Psi^2 \ln p_{fa}} \quad (13)$$

3.1.2 发现概率

当有信号存在时,信号加噪声通过接收机,其电压超过门限电平的概率称为发现概率。振幅为 A 的回波信号同高斯白噪声通过窄带中频滤波器后,再经包络检波器后输出包络的概率密度函数为:

$$p_d(x) = \frac{x}{\psi^2} \exp\left(-\frac{x^2 + A^2}{2\psi^2}\right) I_0\left(\frac{xA}{\psi^2}\right) \quad (14)$$

式中: x 为信号加噪声的包络; $I_0(\cdot)$ 是第一类零阶修正贝塞尔函数。

x 超过门限电平 V_T 的概率即发现概率:

$$P_d = \int_{V_T}^{\infty} P_d(x) dx =$$

$$\int_{V_T}^{\infty} \frac{x}{\psi^2} \exp\left(-\frac{x^2 + A^2}{2\psi^2}\right) I_0\left(\frac{xA}{\psi^2}\right) dx \quad (15)$$

在信号处理领域,常常假设式(15)中的回波信号幅度 A 为固定值,这对于超音速隐身飞机来说会引起较大的误差,因此将其修正为服从某种概率密度分布 $P(A)$ 的随机变量。信号处理中常用对数正态分布、赖斯分布等统计分布模型来拟合目标 RCS 数据。

然而,对于像超音速隐身飞机这样的快起伏目标,现有的拟合模型并不能准确的描述其回波起伏特性,因此本文根据雷达距离方程和信号处理方面的公式,由前面得到的实时雷达散射截面 $\sigma(t)$ 和目标与雷达间的实时距离 $R(t)$,计算得到目标实时回波信号幅度 $A(t)$,由(15)式便可得到超音速隐身飞机飞行过程中的实时雷达发现概率 $P_d(t)$ 。

依据雷达距离方程和信号处理公式可得:

$$\begin{cases} P_r = S_i = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L R^4} \\ S_i = k T_0 B_n F_n (S/N)_0 \\ (S/N)_0 = A^2 \end{cases} \quad (16)$$

联立上式可得到实时回波信号幅度 $A(t)$ 及发现概率 $P_s(t)$:

$$A^2(t) = \frac{P_t G^2 \lambda}{(4\pi)^3 L K T_0 B_0 F_n} \cdot \frac{\sigma(t)}{R^4(t)} \quad (17)$$

$$P_d(t) = \int_{V_T}^{\infty} P_d(x) dx =$$

$$\int_{V_T}^{\infty} \frac{x}{\psi^2} \exp\left(-\frac{x^2 + A^2(t)}{2\psi^2}\right) I_0\left(\frac{x A(t)}{\psi^2}\right) dx \quad (18)$$

3.2 雷达检测性能分析

雷达参数设定如下:系统损耗 $L=15$ dB;虚警概率 $p_{fa}=10^{-6}$;发射功率 $P_T=1\ 000$ kW; k 为玻尔兹曼常数; T_0 为热力学温度,室温下一般取 $kT_0=4 \times 10^{-21}$ J;雷达天线的增益 $G=30$ dB; B_n 为带宽,

取为 1 MHz;噪声系数 $F_n=1.5$ dB。由前文建立的雷达检测性能模型可得超音速隐身飞机以不同速度飞行时的发现概率见图 5。

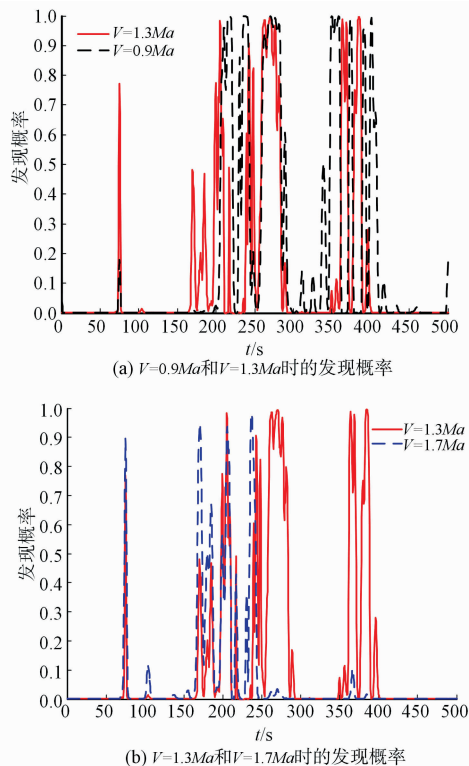


图 5 不同速度的发现概率

Fig. 5 Detection probability of different speeds

对比图 5 中超音速隐身飞机在不同飞行速度时的雷达发现概率可知,在相同的航迹和飞行时间内,当飞机飞至雷达站附近时,发现概率均较大;飞机飞行速度越高,发现概率起伏越剧烈,雷达能有效检测飞机的时间越短,这与图 4 中超音速隐身飞机以不同速度飞行时的动态 RCS 变化趋势相符。

4 结语

针对超音速隐身目标回波信号的准确模拟及雷达发现概率的研究问题是电磁散射与信号处理领域相交汇的重难点问题,本文以典型的超音速隐身飞机为研究对象,仿真计算了其以不同速度飞行时的动态 RCS 序列;建立雷达检测性能模型,以动态 RCS 起伏数据为基础,对比分析了不同飞行速度时的发现概率。该研究为超音速隐身飞机的探测提供了参考。

参考文献(References):

- [1] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社,2005.

- HUANG P K, YIN H C, XU X J. Radar Target Characteristic[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [2] 王大朋,张晨新. 运动特征对飞机动态 RCS 分布特性的影响分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015,16(4):19-23.
- WANG D P, ZHANG C X. An Analysis of the Impact of Movement Feature on Aircraft Dynamic RCS Statistical Characteristics[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2015, 16(4):19-23. (in Chinese)
- [3] 王明琨,张晨新. 典型机动目标动态 RCS 特性研究[J]. 科技通报,2015,31(7):106-111.
- WANG M K, ZHANG C X. Research on Typical Maneuvering Target Dynamic RCS Characteristic[J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(7):106-111. (in Chinese)
- [4] 赵伟军,顾新艳. 起伏目标检测的应用研究[J]. 现代雷达,2015,37(6):32-36.
- ZHAO W J, GU X Y, et al. A Study on the Fluctuating Targets Detecting[J]. Modern Radar, 2015, 37(6):32-36. (in Chinese)
- [5] SWERLING P. Radar probability of detection for some additional fluctuating target cases[J]. IEEE Transactions on AES, 1997, 33(2):698-709.
- [6] MARCUM J I. A Statistical Theory of Target Detection by Pulsed Radar[J]. IRE Transactions on Information Theory, 1960, 1(2):59-267.
- [7] SHNIDMAN D A. Update on Radar Detection Probabilities and Their Calculation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(1):380-383.
- [8] MAYER P, MAYER H. Radar Target Detection-handbook of Theory and Practice[M]. New York: Academic Press, 1973.
- [9] SCHOEFIELD P H R. Statistic Aspects of Ideal Radar Targets[J]. Proc. Of IEEE, 1967, 55(4):587-589.
- [10] HEIBREDER G R, MITCHELL R L. Detection Probabilities for Lot-Normally Distributed Signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1967, 3(1):5-13.
- [11] 杨波,杨建涛. 雷达探测隐身飞机仿真[J]. 中国科技信息,2011(14):29-30.
- YANG B, YANG J T. Simulation of Radar Detection of Stealth Aircraft[J]. China Science and Technology Information, 2011(14):29-30. (in Chinese)
- [12] 林存坤,张小宽. 规避机动对雷达检测概率的影响研究[J]. 现代雷达,2015,37(5):17-20.
- LIN C K, ZHANG X K. A Study on the Influence of Evasive Maneuver on Radar Detection Probability[J]. Modern Radar, 2015, 37(5):17-20. (in Chinese)
- [13] 来侃,陈美玉,孙润军,等. 吸波材料在雷达隐身领域的应用[J]. 西安工程大学学报,2015,29(6):655-665.
- LAI K, CHEN M Y, SUN R J, et al. Electromagnetic Wave Absorbing Materials for Radar Stealth[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2015, 29(6):655-665. (in Chinese)
- [14] 李民权,吴先良. 飞机目标的抖动及雷达散射截面计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2003,26(5):1021-1024.
- LI M Q, WU X L. On The Random Wobble of Flying Radar Targets and The Computer of Radar Cross Section[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science Edition), 2003, 26(5):1021-1024. (in Chinese)
- [15] 罗宏. 动态雷达目标的建模与识别研究[D]. 北京:航天总公司第二研究院,1999.
- LUO H. Research on Distinguishing and Modeling of Dynamic Radar Targets[D]. Beijing: The Second Institute of Aerospace Corporation, 1999. (in Chinese)
- [16] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- RUAN Y Z. Radar Cross Section and Stealth Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press. (in Chinese)
- [17] UFIMTSEV P. Method of Edge Waves in Physical Theory of Diffraction (from the lzd-vo sov. Radio 1962, Russian)[R]. Ohio: Wright-Patterson AFB, 1971.
- [18] MICHAELI A. Equivalent Edge Currents for Arbitrary Aspects of Observation[J]. IEEE Trans Antennas Propagat,1984, 32(3):252-258.

(编辑:姚树峰)