

典型隐身飞机动态 RCS 时间序列研究

周 超¹, 张小宽¹, 张敬伟², 张晨新¹

(1.空军工程大学防空反导学院,陕西西安,710051;2.空军工程大学科研部,陕西西安,710051)

摘要 定义和推导了目标机体坐标系与地面雷达坐标系之间的坐标转换关系式,得到了雷达视线在目标坐标系中的方位角和高低角。通过软件 FEKO 对典型隐身飞机目标 F-22 进行建模,计算得到了目标全空域的静态 RCS 值,并利用 Matlab 仿真分析了动态目标的 RCS 特性变化。仿真结果表明:不同飞行高度以及不同的航路捷径均可以影响机动目标的 RCS 序列,且当目标作适当的俯仰机动后,可以减小目标 RCS 值,给隐身飞机设计飞行航线模拟主动进攻提供仿真依据。

关键词 隐身飞机;坐标转换;俯仰机动;RCS 时间序列

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.03.004

中图分类号 V218;TP391 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)03-0015-04

Analysis of Dynamic RCS Time Series of Typical Stealth Aircraft

ZHOU Chao¹, ZHANG Xiao-kuan¹, ZHANG Jing-wei², ZHANG Chen-xin¹

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: The inter-coordinate transformation relation between target body coordinate and ground-based radar coordinate is defined and derived, the azimuth and the elevation of line of the sight of radar in target body coordinate are obtained in this paper. All-airspace static RCS value can be available by establishing typical stealth aircraft models, including F-22, in software FEKO and the RCS characteristic variation of the dynamic target is simulated and analyzed by using Matlab. The simulation results show that different altitudes and route shortcuts all can influence the RCS series of maneuver target, and the RCS value is lower when the target takes some proper pitch movement. Also the simulation can provide a foundation for the design of flight track for stealth aircraft in simulating active attack.

Key words: stealth aircraft; coordinate transformation; pitch maneuver; RCS time series

面临隐身与反隐身技术带来的攻防关系转换,突防技术是紧紧伴随着隐身技术的不断发展而发展的。目标动态 RCS 时间序列仿真是突防研究的重要内容之一,就是用电磁计算模型得到的目标全空域静态 RCS 数据来仿真目标在飞行过程中随姿态不断变化的 RCS 时间序列,从而为真实环境中动态

RCS 序列的有利利用提供理论支持与仿真依据。

文献[1]建立了雷达测量坐标系与目标机体坐标系之间的坐标转换模型,得出了雷达视线和高低角随时间的变化关系。文献[2~3]对机动目标的定位进行了研究,获得一种基于可观测性定义和特征值分解法相结合的定量确定纯方位量测系统可观测

收稿日期: 2012-11-29

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ 8007)

基金项目: 周超(1988-),男,四川射洪人,硕士生,主要从事复杂目标电磁散射特性及其军事应用研究。

E-mail: zhouchao446030949@163.com

性的方法。文献[4]建立了弹-机追逃对抗飞行数学模型,提出了机动变轨、抛射诱饵以及综合突防方案。文献[5]提出了利用目标的运动航迹求解动态目标姿态角的方法,提出了任意姿态下进行动态雷达目标电磁散射特性仿真的一种思路。文献[6]利用微波暗室静态测量数据,反演了某型弹道目标在典型作战情况下的动态 RCS 时间序列。

但大多数研究主要停留在目标静态 RCS 数据的获得方面,利用静态 RCS 数据库关联目标动态 RCS 时间序列的应用较少。基于文献[4~5]的启发,本文通过对典型隐身飞机 F-22 的建模,得到目标全空域静态 RCS,再将雷达视线坐标转换应用于分析目标机动飞行对 RCS 时间序列的影响。

1 坐标系定义及其转换关系

1.1 雷达坐标系

地面雷达坐标系 $O_R X_R Y_R Z_R$ 固定于雷达之上。它以雷达所在地为坐标原点 O_R , Z_R 轴铅垂向上。 X_R 轴和 Y_R 轴位于水平面内,它们的指向可以根据具体情况选取,本文取 X_R 轴为正东方向, Y_R 轴为正北方向,三者构成右手直角坐标系。

M 点和目标点在雷达坐标系中用直角坐标分别表示为 $(x(t), y(t), z(t))$ 、 $(x_T(t), y_T(t), z_T(t))$:

$$\begin{cases} x(t) = r(t) \sin \beta(t) \cos \epsilon(t) \\ y(t) = r(t) \sin \beta(t) \sin \epsilon(t) \\ z(t) = r(t) \cos \beta(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_T(t) = r_0(t) \sin \beta(t) \cos \epsilon(t) \\ y_T(t) = r_0(t) \sin \beta(t) \sin \epsilon(t) \\ z_T(t) = r_0(t) \cos \beta(t) \end{cases} \quad (2)$$

1.2 目标机体坐标系

目标机体坐标系 $O_T X_T Y_T Z_T$ 固定于隐身飞机上。它以机体中心为原点 O_T , X_T 轴平行于机身轴线指向前方, Z_T 轴位于目标对称平面内,垂直于 X_T 轴指向上方, Y_T 轴垂直于目标对称平面,其指向由

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \cos \alpha(t) \cos \gamma(t) + \sin \alpha(t) \sin \gamma(t) \sin \eta(t) & \sin \alpha(t) \cos \gamma(t) & -\cos \alpha(t) \sin \gamma(t) + \sin \alpha(t) \cos \gamma(t) \sin \eta(t) \\ -\sin \alpha(t) \cos \gamma(t) + \cos \alpha(t) \sin \gamma(t) \sin \eta(t) & \cos \alpha(t) \cos \gamma(t) & \sin \alpha(t) \sin \gamma(t) + \cos \alpha(t) \cos \gamma(t) \sin \eta(t) \\ \sin \alpha(t) \cos \gamma(t) & -\sin \gamma(t) & \cos \gamma(t) \cos \eta(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

如果将 M 点移至雷达坐标系原点处,即令 $(x(t), y(t), z(t))$ 坐标值为 $(0, 0, 0)$, 代入式(3)即可解算出雷达位置(或称为雷达视线)在目标机体坐标系中的坐标表示,即:

$$\begin{bmatrix} x_T(t) & y_T(t) & z_T(t) \end{bmatrix}^T = -\mathbf{P} \begin{bmatrix} x_R(t) & y_R(t) & z_R(t) \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

则式(5)中坐标 $(x_T(t), y_T(t), z_T(t))$ 就表示雷达站所在地在经过旋转的目标机体坐标系中的坐

右手法则确定。

1.3 姿态角定义

机体目标姿态角定义如下:机身纵轴 $O_T X_T$ 与地面雷达坐标系平面 $X_R O_R Y_R$ 间的夹角称为俯仰角 $\gamma(t)$, 相对于平面 $X_R O_R Y_R$ 来说,飞机抬头时俯仰角为正值;飞机纵轴 $O_T X_T$ 在 $X_R O_R Y_R$ 平面的投影与雷达坐标系 $O_R X_R$ 轴负向的夹角称为偏航角 $\alpha(t)$, 且从 $O_R Z_R$ 轴的正方向往下看,以 $O_R X_R$ 轴负向为基准,逆时针转出的角度为正值;飞机纵对称平面与包含纵轴的垂直平面间的夹角为滚动角 $\eta(t)$, 实际上就是从飞机尾部往前看时机身绕目标纵轴 $O_T X_T$ 顺时针转动的角度,此时转出的角度为正。这3个角度描述了机体目标坐标系与地面雷达坐标系之间的关系,见文献[7~8]。

1.4 两坐标系之间的转换关系

当飞机按预定航线飞行时,由雷达测量的 RCS 值是随时间连续变化的,这主要是由于飞机快速飞行以及自身姿态的变化都会引起雷达视线在目标机体坐标系中随时间不断变化。因此,必须根据飞机在雷达坐标系中航迹和姿态的变化,求解出雷达视线在目标机体坐标系中方位角 $\phi(t)$ 和俯仰角 $\theta(t)$ 随时间变化的关系。

2 坐标系之间的变换关系如下:

$$\begin{bmatrix} x_T(t) \\ y_T(t) \\ z_T(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_R(t) \\ y - y_R(t) \\ z - z_R(t) \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} x - x_R(t) \\ y - y_R(t) \\ z - z_R(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: (x, y, z) 为雷达坐标系中任意一点的坐标; $(x_R(t), y_R(t), z_R(t))$ 为飞机航迹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) 在目标机体坐标系中的坐标; \mathbf{P} 为雷达坐标系到机体坐标系的变换矩阵,其分量分别由以下关系式确定:

标。若知道目标在雷达坐标系中的坐标,就可以由式(1)~(5)以及式(6)~(8)求出雷达视线在机体坐标系中随时间变化的斜距 $r(t)$ 、方位角 $\varphi(t)$ 和俯仰角 $\theta(t)$:

$$r(t) = \sqrt{x_T(t)^2 + y_T(t)^2 + z_T(t)^2} \quad (6)$$

$$\varphi(t) = \arctan(y_T(t)/x_T(t)) \quad (7)$$

$$\theta(t) = \arccos(z_T(t)/r(t)) \quad (8)$$

2 目标建模与仿真计算

要仿真目标动态 RCS 时间序列随姿态角的变化情况,必须首先建立目标电磁计算模型,获得目标全空域的静态 RCS 数据,图 1 是利用电磁仿真计算软件 FEKO 建立的典型隐身飞机 F-22 目标模型及得到的全空域静态 RCS 三维图形^[9-11]。

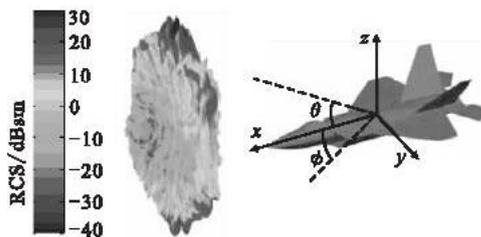


图 1 典型隐身飞机建模及全空域静态 RCS 三维图形

Fig.1 Models of typical stealth aircraft and three dimensional static RCS of all airspace

从图 1 中可以看出,在不同的雷达视线角度所观测到的目标 RCS 值有所差异,如果在隐身飞机飞行过程中能够通过调整飞机相对于地面雷达的姿态角,充分利用 RCS 较小的机头区域,则可以减小飞机被雷达探测的可能性,增加隐身飞机成功突防的机会。

将获得的全空域 RCS 数据作为仿真的输入数据,利用推导的坐标系转换公式,设定隐身飞机的飞行航迹,建立仿真数学模型,即可得出动态 RCS 序列^[12],见图 2。



图 2 动态 RCS 序列仿真流程图

Fig.2 Dynamic RCS series simulation flow chart

下面分别就飞行高度 H 、航路捷径 P 、有无俯仰机动等 3 个方面探讨随飞机姿态角而改变的 RCS 时间序列变化情况。假定:隐身飞机以 $v=300$ m/s 从正东方向飞来,突防起点选取与雷达站水平距离 $x=100$ km 处,仿真分类情况见表 1。

表 1 仿真设定

Tab.1 Cases in simulation

情况	动作
1	P 为 0, 没有作机动
2	P 不为 0, 没有作机动
3	P 为 0, 作俯仰机动
4	P 不为 0, 作俯仰机动

首先分析不同仿真情况下 F-22 隐身飞机 RCS 时间序列变化趋势见图 3~4。

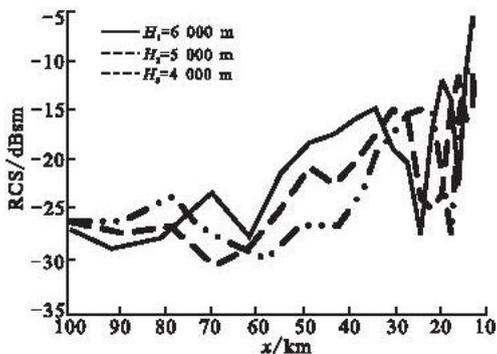


图 3 F-22 隐身飞机情况 1 的 RCS 序列

Fig.3 RCS series of F-22 in case 1

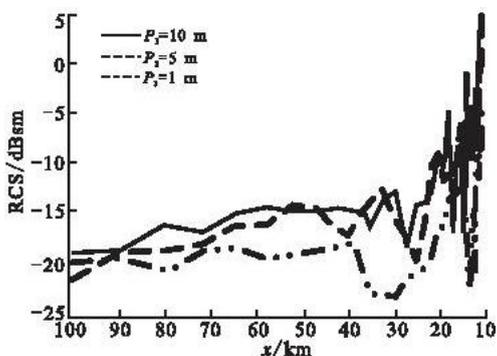


图 4 F-22 隐身飞机情况 2 的 RCS 序列

Fig.4 RCS series of F-22 in case 2

从图 3 中可以看出,随着目标接近雷达站,在 20~60 km 飞行段飞行高度越低 RCS 越小,这也正是飞机目标采取低空飞行突防的原因所在。不难理解,任意方向上水平朝雷达站飞行时的情况与之一致,此处不再赘述。从图 4 中可以看出,给定飞行高度,航路捷径 P 越大,RCS 值反而越大。其原因是因为飞机侧面棱边的散射增强以及垂尾的镜面反射增大导致的,这一点从图 1 全空域 RCS 图中也可以得到很好的说明。但是从图 3~4 中均可以明显的看出,当隐身飞机越接近雷达时,RCS 值有逐渐增加的趋势。因此,为了获得更低的 RCS 实现突防,必须采取机动措施。图 5~6 是 F-22 隐身飞机采取俯仰机动措施以后的 RCS 序列变化曲线。

图 5~6 显示:F-22 隐身飞机飞行至与雷达坐标原点水平距离 58 km 处,作俯仰机动,很明显机动后的目标 RCS 序列值有所降低。虽然 RCS 序列值随着距离接近而逐渐增大,但此时雷达距离隐身飞机的空间距离较小(小于 6 km),早已处于隐身飞机的攻击范围内,因此采取适当机动减小目标 RCS 的措施是有效的。

从对 F-22 典型隐身飞机动态 RCS 时间序列的仿真中看出,采取适当的机动飞行能够减小目标 RCS,能够给对方雷达探测带来一定压力,为成功设计最佳飞行航线实现突防打下基础。

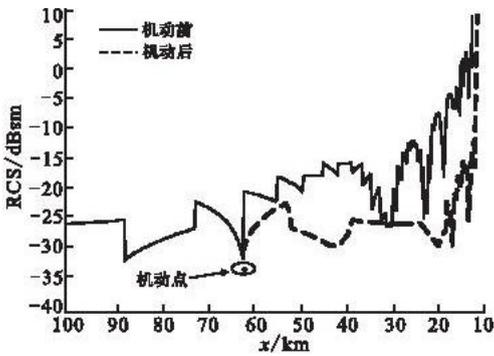


图5 F-22 隐身飞机情况3的RCS序列

Fig.5 RCS series of F-22 in case 3

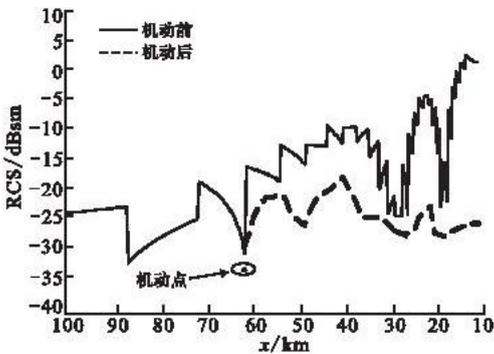


图6 F-22 隐身飞机情况4的RCS序列($P=5$ km)

Fig.6 RCS series of F-22 in case 4($P=5$ km)

3 结语

随着隐身技术的不断发展及其在作战飞机上的深入应用,目标动态 RCS 的研究会越来越受到攻防双方的重视。因此,研究不同飞行姿态对减小目标动态 RCS 序列的影响,对成功实现机动目标突防有着重要的意义。从以上仿真中可以得到以下基本结论:不同 H 以及不同的 P 均可以影响目标的 RCS 序列,且当目标作适当航线的俯仰机动后,可以减小目标 RCS 值,为机动目标成功实现突防打下基础。下一步的主要工作是在提高 F-22 隐身飞机电磁计算模型逼真度的基础上,更加精细化地设计作战飞机的飞行航线,为隐身飞机模拟进攻作战提供理论支持和仿真依据。

参考文献(References):

[1] 童俊,单甘霖,周云峰,等.基于姿态角变化的目标体坐标系下雷达视线研究[J].火力与指挥控制,2009,34(9):38-40.
TONG Jun, SHAN Ganlin, ZHOU Yunfeng .et al. The study of line of sight of radar based on variational target body coordinate[J]. Fire control & command control, 2009, 34(9)38-40. (in Chinese)

[2] Li X R, Vesselin PJilkov. Survey of maneuvering target tracking part V: multiple-model methods [J]. IEEE trans on aerospace and electronic systems, 2005, 41(4): 89-92.

[3] 熊茂涛,张勇,吴钦章.基于纯方位量测的三维运动目标可观测性研究[J].现代防御技术,2009,37(4),30-34.
XIONG Maotao, ZHANG Yong, WU Qinzhang. Observability of yhree-dimensional moving yargets nased on nearings only measurements[J].Modern defence technology, 2009, 37(4), 30-34. (in Chinese)

[4] 王斯财,南英,刘经纬.导弹迎击时飞机的最佳逃逸策略研究[J].航空兵器,2009(4):28-32.
WANG Sicai, NAN Ying, LIU Jingwei. Optimal escape strategy of fighter against on coming missiles [J]. Aero weaponry, 2009(4):28-32. (in Chinese)

[5] 陈俊吉,黄剑伟,许家栋,等.动态雷达目标电磁散射中姿态角的计算[J].弹箭与制导学报,2010,30(6):183-185.
CHEN Junji, HUANG Jianwei, XU Jiadong .et al. Calculation of attitude angle in dynamic radar targets electromagnetic scattering [J]. Journal of projectiles rockets missiles and guidance, 2010, 30(6):183-185. (in Chinese)

[6] 饶彬,屈龙海,肖顺平,等.基于时间序列分析的弹道目标进动周期提取[J].电波科学学报,2011,26(2),291-295.
RAO Bin, QU Longhai, XIAO Shunping .et al. Precession period extraction of ballistic targets based on time series analysis[J]. Chinese journal of radio science, 2011, 26(2), 291-295. (in Chinese)

[7] 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 Peikang, YIN Hongcheng, XU Xiaojian. Radar target characteristic [M]. Beijing: Publishing house of electronic industry, 2005. (in Chinese)

[8] 杨建军,王君,赵英俊,等.地空导弹武器系统概论[M].北京:国防工业出版社,2008.
YANG Jianjun, WANG Jun, ZHAO Yingjun, et al. Outline of weapon system of surface-to-air missile [M]. Beijing: National defense industry press, 2008. (in Chinese)

[9] Peres J, Catedra M. Application of physical optics to the RCS computation of bodies modeled with nurbs surface[J]. IEEE trans antennas propagat, 1994, 42(10): 1404-1411.

[10] Gray G Y, Moon K K. Dynamic modeling of flexible multi-body structures[J]. IEEE trans aerosp electrton syst, 1999, AES-35(1):148-155.

[11] 阎照文,苏东林,袁晓梅. FEKO5.4 电磁场分析与实例详解[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
YAN Zhaowen, SU Donglin, YUAN Xiaomei. FEKO5.4 electromagnetic field analytical technique and example illustration [M]. Beijing: China water power press, 2009. (in Chinese)

[12] Bar Shalom Y. Multi target-multi-sensor tracking: advanced applications [M]. Dedham, MA: Arteth house, 1990.