

基于雷达成像的地面停留隐身飞机探测

蒋忠进^{1,2}, 赵书敏^{3,4}, 耿江东³, 李希同^{1,2}

- (1. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096;
2. 东南大学无线通信技术协同创新中心, 江苏南京 210096;
3. 中国空空导弹研究院, 河南洛阳 471009;
4. 清华大学精密仪器系, 北京 100084)

摘 要: 隐身飞机的电磁散射特性和雷达成像是反隐身的重要研究内容。国内对隐身飞机散射特性的研究基本集中在雷达散射截面(RCS)的计算和分析方面, 该文则侧重于对隐身飞机的合成孔径雷达(SAR)成像进行仿真和分析。RCS 分析侧重于探测在空中飞行的隐身飞机, 而 SAR 成像可用于探测停留在地面的隐身飞机。以 F-22 飞机为例, 进行隐身飞机的 SAR 成像仿真, 研究结果表明, 目前美国的隐身飞机并不是全角度隐身的, 用机载 SAR 成像雷达可以发现停留在机场上的隐身飞机。

关键词: 隐身飞机; 电磁散射; 雷达散射截面; 合成孔径雷达成像; 反隐身

中图分类号: TN957 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2016)01-0054-05

Detectability Analysis of Stealth Aircraft Stopping on the Ground Based on SAR Imaging Simulation

JIANG Zhongjin^{1,2}, ZHAO Shumin^{3,4}, GENG Jiangdong³, LI Xitong^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Synergetic Innovation Center of Wireless Communication Technology, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China; 4. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The electromagnetic scattering characteristics and radar imaging analysis of stealth aircrafts are the important contents of anti-stealth research. Domestic research of scattering characteristics of stealth aircrafts is mainly focused on the simulation and analysis of radar cross-section(RCS), while the research in this paper is mainly focused on the simulation and analysis of SAR imaging of stealth aircrafts. Analysis of RCS is suitable for the exploration of stealth aircrafts flying in air, while SAR imaging is suitable for the exploration of stealth aircrafts stopping on the airfield. The F-22 is taken as an example of stealth aircraft in SAR simulation in this paper. It is shown by the research results that the present stealth aircraft in USA can not be well in stealth globally in all angle, and the stealth aircrafts stopping on the airfield can be explored by the airborne SAR-imaging radar.

Key words: stealth aircraft; electromagnetic scattering; radar cross-section(RCS); synthetic aperture radar(SAR) imaging; anti-stealth

0 引 言

如今美国已经有 F-22 隐身战斗机和 B-2 隐身战略轰炸机正在服役, F-35 隐身战斗机、X-47B 隐身无人机和一些其他型号的隐身飞机正在研制和试飞, 而著名的隐身轰炸机 F-117 则已经退役。除美国以外, 其他国家也在大力研制隐身飞机, 以适

应现代战争的需要。这些国家的隐身飞机对我国的军事安全形成潜在的威胁, 如何进行反隐身是一个迫切需要解决的问题。

国内众多科研机构对反隐身的基础理论和应用技术进行了大量研究, 包括隐身飞机的电磁散射特性、低频雷达、雷达组网和多基地雷达等^[1-9]。在电磁散射特性方面, 国内的研究主要集中在雷达散射截面(RCS)的分析, 包括 RCS 的方向特性、

频率特性和极化特性。各研究结果均表明,目前的隐身飞机在俯仰角为 $90^\circ \pm 30^\circ$ 、方位角为 $0^\circ \pm 30^\circ$ 范围内,后向单站 RCS 可低达约 -30 dB,很难被我方雷达探测到。此处,俯仰角 90° 表示水平方向,方位角 0° 表示飞机的鼻锥方向。

目前的隐身技术已经达到一定的高度,但还是存在不足,如不能全角度和全频段隐身、机动性会受到影响、外挂设备内置会导致弹载量降低等^[4]。由于不能全角度隐身,使得隐身飞机在某些角度能被探测到,比如当它们停留在地面机场时,就可以被机载 SAR 成像雷达发现,因为此时机载雷达已经避开了隐身飞机的最佳隐身范围。

本文的研究侧重于探讨当隐身飞机停留在地面上时的可探测性,即采用 SAR 成像的方式,看能否发现停留在机场上的隐身飞机。该研究涉及到敌方与隐身飞机相关的军事部署,在情报获取方面具有重要的应用价值。本文以 F-22 为例,对隐身飞机进行 SAR 成像仿真,发现在俯仰角为 45° 左右时,能够得到隐身飞机的清晰 SAR 成像。

1 隐身飞机的散射结构设计

目前在役的隐身飞机主要采用两方面的成熟技术进行隐身,即散射结构设计和吸波材料涂覆,能够将飞机的 RCS 降低 $20 \sim 30$ dB,其中散射结构设计的贡献估计占 $2/3$ 左右^[10]。隐身性能的频率特性、极化特性与飞机的散射结构和吸波材料均有关,但隐身性能的方向特性主要与飞机的散射结构有关。本文的研究与隐身性能的方向特性密切相关,所以将专注于散射结构设计方面。

散射结构设计的思想主要体现在如何确定飞机的表面结构,使照射它的雷达电磁波不能形成有效的后向散射,以避免被敌方雷达发现。研究结果表明,如果一个平面与雷达波束成 90° 角,它就会产生很大的单站 RCS,但当它倾斜使其法向偏离雷达波束时,其 RCS 就会迅速减小。以 F-117 飞机为例,由于雷达探测区域通常在飞机水平面上下 30° 范围内,所以飞机的大部分表面与垂向的夹角都大于 30° ^[10],其 CAD 模型如图 1 所示。除此之外,尽量使边缘不与电磁波入射方向垂直,可以降低边缘后向散射。

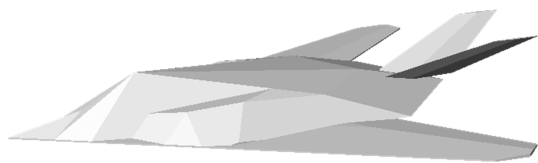


图1 F-117 飞机 CAD 模型

在 F-22 飞机的结构设计上,采用了 S 形进气道抑制后向散射,同时采用外倾式双垂尾设计,降低尾翼的 RCS 贡献^[1]。B-2 隐形轰炸机采用翼身融合结构,机身表面圆滑过度,可以化镜面反射为边缘绕射,变边缘绕射为爬行波。机体表面不能存在突出结构,同时将各种外挂设备采用内置式安装,因为这些结构和设备容易形成后向强散射。

综观隐身飞机的散射结构设计,首先要照顾到迎头方向的隐身,在电磁波迎头照射时,把散射场分布到一些不重要的方向去,尽量不要形成后向散射。但这也意味着隐身飞机的隐身性能并不是全角度的,在非迎头方向,隐身飞机的单站 RCS 完全可能大幅增加。

2 隐身飞机的 RCS 特性分析

本文以 F-22 飞机为例,对其 RCS 方向特性进行仿真,包括水平方向性和俯仰方向性,F-22 飞机的 CAD 模型如图 2 所示。仿真代码为 SBR 高频算法,仿真频率为 10 GHz,包括 HH 和 VV 两种极化方式。

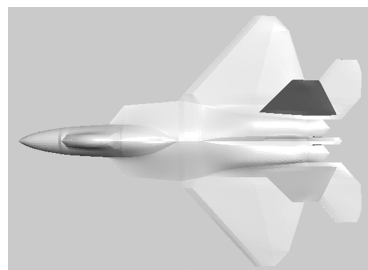


图2 F-22 飞机 CAD 模型俯视图

图 3 为 F-22 飞机在俯仰角为 45° 和 90° 时的 RCS 水平方向性比较。由图可见,在俯仰角为 90° 时,不论是 HH 极化还是 VV 极化,F-22 飞机在方位角处于 $0^\circ \pm 30^\circ$ 范围内的 RCS 都低于 -20 dB,具有很好的隐身性能。由于此处只研究飞机的散射结构设计,CAD 模型的材料属性设置为金属,故无法考虑吸波材料的贡献,否则 F-22 飞机的迎头 RCS 可以低至 -30 dB。

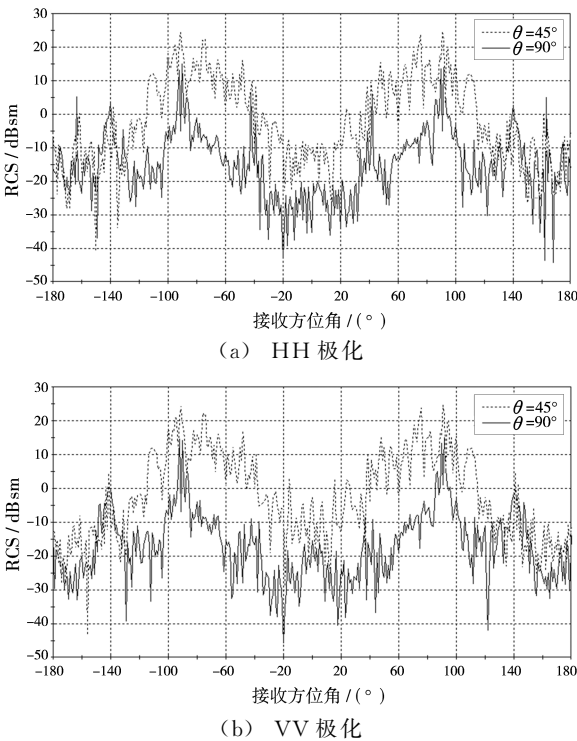


图 3 俯仰角为 45°和 90°时的 RCS 水平方向性对比(10 GHz)

但在俯仰角抬升到 45°时,不论是 HH 极化还是 VV 极化,F-22 飞机的 RCS 都会大幅上升,在迎头方向上升约 10 dB,两侧上升约 20 dB,尾向也有所上升。这就说明,在俯仰角抬升时,F-22 飞机的隐身性能明显降低。

为了进一步证明上述结论,本文对 F-22 飞机进行俯仰向 RCS 曲线仿真,方位角分别为 0°和 45°。仿真结果如图 4 和图 5 所示,为了便于查看,此处采用极坐标进行曲线绘制。由图可见,在俯仰角偏离 90°±30°后,不论是 HH 极化还是 VV 极化,F-22 的 RCS 都会明显增加。在方位角为 45°的情况下,这种变化更为明显,在俯仰角达到 90°±45°时,RCS 可达 10dB 左右。

根据以上结果可见,在俯仰角为 90°±30°时,F-22 飞机在迎头方向具有很好的隐身性能,但在俯仰角抬升到 45°左右时,这种隐身性能下降。俯仰角 45°属于机载 SAR 成像的视角范围,所以当隐身飞机停留在地面机场上时,应该可以被机载 SAR 成像雷达发现。

3 隐身飞机的 SAR 成像仿真

本文对 F-22 飞机的 SAR 成像进行了仿真和

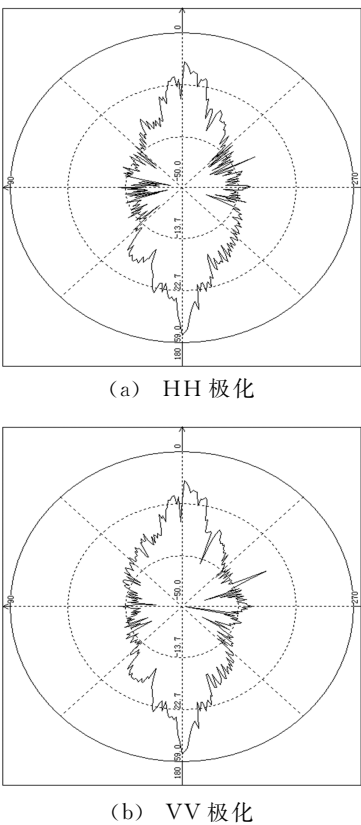


图 4 方位角为 0°时的 RCS 俯仰方向性(10 GHz)

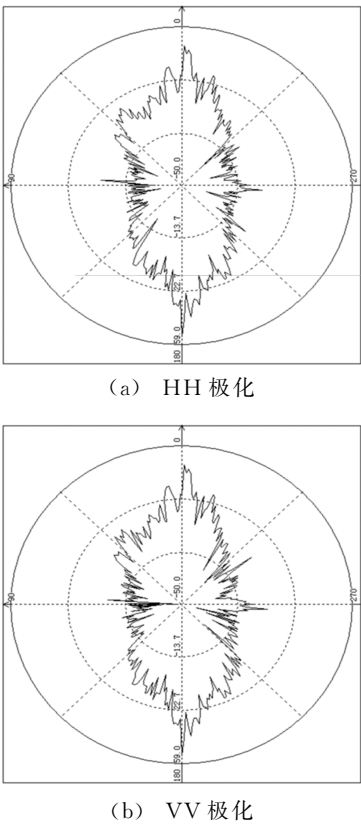


图 5 方位角为 45°时的 RCS 俯仰方向性(10 GHz)

分析。为了进行对比,将非隐身的 E-2 预警机与 F-22 飞机置于同一个场景,同时进行 SAR 成像,场景如图 6 所示。为了在成像过程中互不遮挡,故在两个飞机之间拉开一定距离。本文使用的 SAR 成像仿真代码是基于 SBR 技术的时域成像算法,成像中心频率为 10 GHz,分辨率为 0.3 m。

SAR 成像结果如图 7 和图 8 所示。图 7 为俯

仰角 85°、方位角 0°时的 SAR 图像,所处视角位于隐身飞机的最佳隐身范围。由图可见,不论是 HH 极化还是 VV 极化,E-2 预警机都能被清晰探测,而 F-22 飞机则完全无法分辨,体现了非隐身飞机和隐身飞机的差别。其中 E-2 预警机的后半部分成像不清晰,这是因为入射电磁波被前半部分遮挡的缘故。

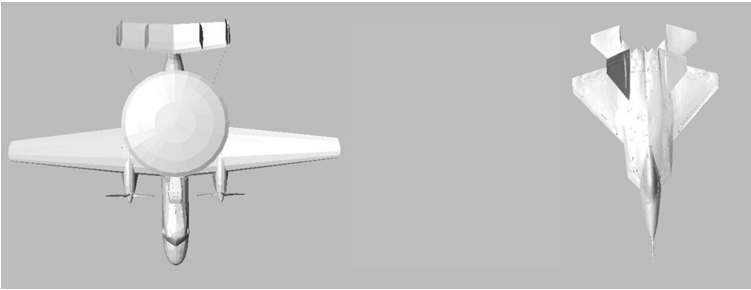
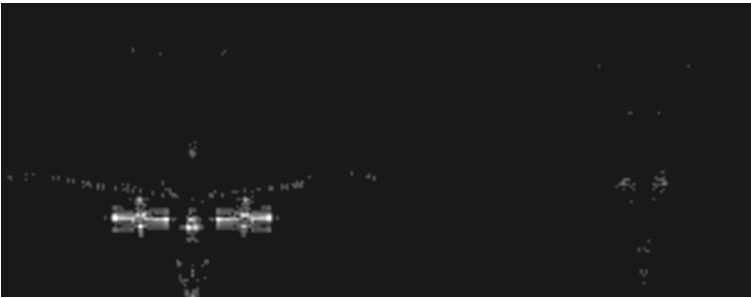


图 6 E-2 飞机和 F-22 飞机置于同一个场景

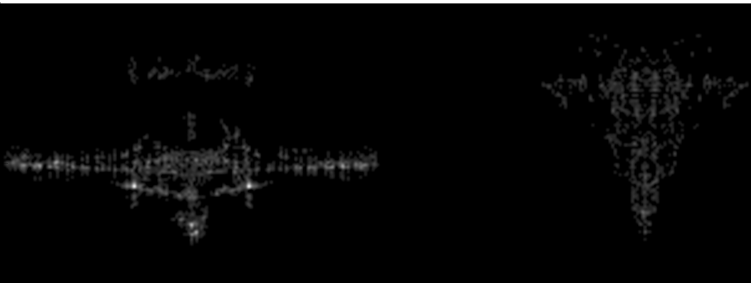


(a) HH 极化

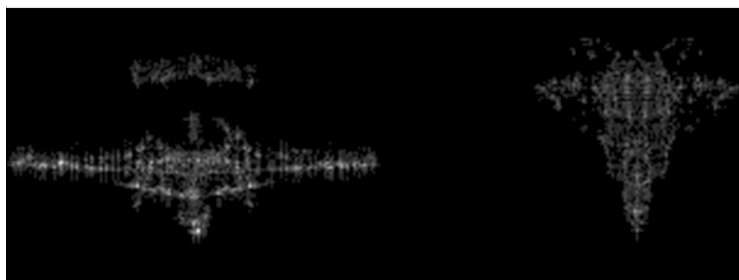


(b) VV 极化

图 7 俯仰角 85°、方位角 0°时的 SAR 成像



(a) HH 极化



(b) VV 极化

图 8 俯仰角 45° 、方位角 0° 时的 SAR 成像

在图 8 中, SAR 成像的俯仰角为 45° , 方位角为 0° , 所处视角在隐身飞机的最佳隐身范围之外。由图可见, 不论是 HH 极化还是 VV 极化, E-2 预警机和 F-22 飞机都能被清晰发现。由于俯仰角抬升, 飞机的前半部分不会对后半部分形成电磁波的遮挡, 所以两个飞机的整体都能清晰成像。所以, 当隐身飞机停留在机场上时, 可以通过机载 SAR 成像进行探测。

4 结束语

本文对隐身飞机的电磁散射结构设计进行了探讨, 仿真和分析了 F-22 隐身飞机的 RCS 方向性和 SAR 成像, 发现 F-22 飞机的隐身并不是全角度的。在俯仰角处于 $90^\circ \pm 30^\circ$ 范围内时, F-22 飞机具有很好的隐身性能, 但当俯仰角不在该范围内时, 其隐身性能大幅降低。本文设定了 F-22 飞机停留在地面上的情况, 以俯仰角 45° 进行 SAR 成像, 发现 F-22 飞机可以被清晰探测。

本文的仿真和分析仅以 F-22 飞机为例。虽然不同的隐身飞机在电磁散射特性上有很大的不同, 但在进行散射结构设计时, 各种隐身飞机均以迎头方向为重点隐身方向。当从包括俯仰角 45° 在内的斜上方进行探测时, 各种隐身飞机的隐身性能均大幅下降, 因此关于 F-22 飞机的结论可以作为其他隐身飞机探测的参考。

另外, 本文在 SAR 成像时没有考虑地面的影响, 包括地面自身的 SAR 成像特征, 以及地面与飞机之间的互耦效应对飞机 SAR 成像的影响, 这些将在后续研究中予以实现。

参考文献:

[1] 张云飞, 马东立, 武哲, 等. 两种隐身飞机模型的雷达散射特性测试与分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(2): 147-150.

[2] 吴剑旗. 反隐身与发展先进米波雷达[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(1): 1-4.
WU Jianqi. Anti-Stealth and Development of Advanced Metric-Wave Radar [J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(1): 1-4. (in Chinese)

[3] 韦笑, 殷红成, 黄培康, 等. F117A 隐身飞机的电磁散射特性研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(4): 492-494.

[4] 黄坤, 张剑, 雷静, 等. 隐身飞机目标探测方法研究[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(5): 6-9.

[5] 徐会法, 梁幼鸣, 刘维伟. 基于探测概率的雷达网反隐身开关机模型[J]. 雷达科学与技术, 2007, 5(2): 95-99.
XU Huifa, LIANG Youming, LIU Weiwei. The Model of Opening/Closing Radars for Radar Network Anti-Stealth Based on Detection Probability[J]. Radar Science and Technology, 2007, 5(2): 95-99. (in Chinese)

[6] 宫健, 王春阳, 李为民, 等. 隐身飞机模型双站雷达截面面积仿真[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(1): 46-52.

[7] 陈世春, 黄沛霖, 姬金祖. 典型隐身飞机的 RCS 起伏统计特性[J]. 航空学报, 2014, 35(12): 3304-3314.

[8] 庄亚强, 张晨新, 张小宽, 等. 典型隐身飞机动态 RCS 仿真及统计分析[J]. 微波学报, 2014, 30(5): 17-21.

[9] 李金梁, 李永祯, 王雪松. 米波极化雷达的反隐身研究[J]. 雷达科学与技术, 2005, 3(6): 321-326.
LI Jinliang, LI Yongzhen, WANG Xuesong. Study on Anti-Stealth with Meter-Band Polarimetric Radar[J]. Radar Science and Technology, 2005, 3(6): 321-326. (in Chinese)

[10] 王狂飙. 隐身飞机的战术技术特点分析与防御对策[J]. 火力与指挥控制, 2003, 28(6): 1-4.

作者简介:



蒋忠进 男, 1973 年生于四川省中江县, 博士, 东南大学信息科学与工程学院副教授, 主要研究方向为雷达目标电磁散射特性、雷达目标成像和 SAR 图像处理算法。
E-mail: zjjiang@seu.edu.cn