

机载天线 RCS 减缩及其布局设计

陈加海^{1,2} 周建江¹

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016; 2. 成都飞机设计研究所, 成都, 610091)

摘要:机载天线系统是飞机的强散射源之一,对飞机隐身性能有着重要的影响。本文针对国外第四代战斗机机载天线系统的设计与布局,研究了具有低散射特性的机载天线系统设计技术措施,讨论了其机理和效能。对机载天线系统进行雷达散射截面(Radar cross section, RCS)减缩设计与布局,在保证系统性能的同时,有效降低其 RCS。

关键词:隐身技术;机载天线;雷达散射截面;天线布局

中图分类号: TN82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2014)06-0845-06

Airborne Antennas RCS Reduction and Layout Design

Chen Jiahai^{1,2}, Zhou Jianjiang¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Chengdu Aircraft Design Institute, Chengdu, 610091, China)

Abstract: Airborne antennas system is the major contributor of aircraft scattering, which plays an important role in the aircraft stealth. Focusing on the airborne antennas design and layout for the fourth generation fighter, the design of airborne antenna system with low scattering is studied and the principles and performance are discussed. The radar cross section (RCS) is reduced and the layout design is presented to maintain the system performance.

Key words: stealth technique; airborne antenna; radar cross section; antenna layout

国外第四代战斗机在隐身、超声速巡航、过失速机动等方面提出了很高的要求,采用高度综合的任务系统大大提升了飞机的作战效能,这就需要机载天线系统具有更宽的工作频段、更丰富的系统功能以及更优良的电磁散射特性^[1]。传统的机载天线具有较大的雷达散射截面(Radar cross section, RCS),单个未采取隐身措施的机载天线 RCS 约为 0.02 m²。据报道,隐身飞机具有良好的低散射性能(见表 1),B-2 和 F-117 的雷达散射截面

在 0.025~0.1 m² 之间,仅比蝗虫大一点。可见,仅一个天线的散射截面就与整个 F-117 飞机的散射截面相当。如果采用传统天线实现新一代战斗机的系统功能,将产生较强的雷达目标散射特征,从而破坏飞机的隐身特性^[2]。

传统飞机的天线多数是突出飞机外表安装的,如通信导航识别(CNI)系统的各种刀形天线、电子战系统的电子干扰(ECM)天线。而对于隐身飞机而言,飞机外表面几乎见不到任何凸出的天线。图 1

表 1 各型飞机的 RCS

Tab. 1 RCS of aircrafts

飞机型号	B-52	Tu-160	FB-111	F-4	Mig-21	Su-27	阵风	B-1B	B-2	F-117A
RCS/m ²	100	15	7	6	4	3	2	0.75	0.1	0.025

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(NJ20140010)资助项目;江苏省高校优势学科建设工程资助项目;雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室(南京航空航天大学)资助项目。

收稿日期:2013-12-06;**修订日期:**2014-04-18

通信作者:周建江,男,教授,博士生导师,E-mail:zjjee@nuaa.edu.cn。

为具有低散射特征飞机外形上叠加若干副传统天线前后的 RCS 结果对比^[3],可见凸出外形的传统天线显著降低了隐身飞机的低 RCS 性能。因此,设计隐身性能好、系统功能强的机载天线系统成为亟待解决的课题,即天线综合和低散射天线设计技术应运而生。

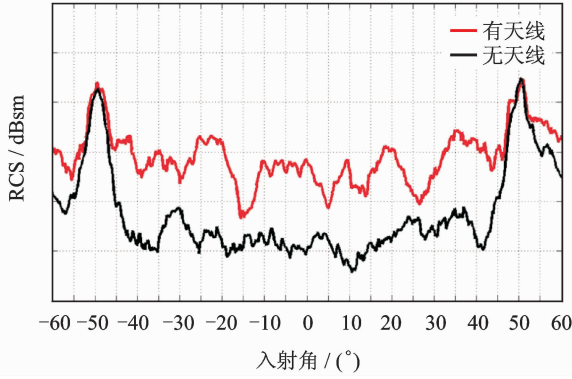


图1 低散射特征飞机外形上叠加若干传统天线前后的 RCS 结果对比

Fig.1 Comparison between RCS of low scattering aircraft with and without traditional antennas

对于战斗机机载天线的综合技术,国外很早就开展了此方面的概念研究。美国第四代战斗机 F-22 以“宝石柱”(Pave Pillar)计划设计思想为基础,采用了高度综合的航空电子系统,其系统结构集成了美国空军 20 世纪 80 年代中后期提出的三项研究计划的研究成果:综合通信、导航和识别航空电子系统(ICNIA)计划、综合电子战系统(INEW)计划和“宝石柱”计划。其全机天线也相应地进行了

综合,优化了布局,同时,也选用了具有低散射特性的天线形式,以优化天线本身的雷达目标特性。欧洲国家也在 ASAAC 第二阶段和 AMSAR 项目中加强了这方面的研究。

天线综合实际上是同一频段功能不尽相同的天线,但尽量采用一个天线孔径实现其功能,从而达到减少全机天线孔径的总体数量。F-35 飞机采用高度综合的天线系统,其天线孔径数目减少到 20 个左右,为低 RCS 天线系统设计提供了良好的基础。中国针对天线综合、布局和优化等方面的研究仍处于起步阶段,现仅有极少数部分天线实现了综合或共用(如通信和导航天线),并且对于天线的低散射控制处于初级阶段,与国外已从飞机天线布局角度进行综合和散射控制尚有较大差距^[4-7]。

本文围绕国外第四代战斗机机载天线系统的设计,从天线散射减缩的角度研究了天线综合与布局控制问题,对低散射结构外形、天线布局、天线倾斜安装、天线综合等关键技术措施的机理与效能进行了分析讨论,为新一代战斗机机载天线系统的综合设计与应用提供了依据。

1 国外第四代战斗机的天线分类与布局

1.1 国外第四代战斗机的天线分类

从国外经验来看,第四代战斗机普遍采用隐身设计和高度综合的任务系统,因此对机载天线系统提出了很高的要求。通过对机载天线资料研究,第四代飞机上各类机载天线及其要求可分类为如表 2

表 2 国外第四代战斗机机载天线统计和分类表

Tab.2 Table of the airborne antennas on the foreign 4th generation fighter

系统或设备	频率/GHz	天线增益/dBi	天线类型	空间覆盖/rad	天线数量	使用频度/%
雷达	8~12	25~40	AESA	$3\pi+$	3	50
雷达告警	2~90	0+	固定	4π	4	100
雷达干扰	2~18	0~35	AESA	4π	4	50
指令发射机	~10	0~35	AESA	$3\pi+$	4	1
IFF 询问	~1	0~12	AESA	$3\pi+$	2	1
IFF 应答	~1	0+	固定	4π	2	100
航管	~1	0+	固定	4π	1	1
超短波通信	V/UHF	0+	固定	4π	2	100
卫星通信	8~9	~20	AESA	2π	1	1
数据传输	~1	0+	固定	4π	2	100
微波着陆	~5	0+	固定	4π	2	1
GPS	~1	3+	固定	2π	1	100
高度表	~4	~10	固定	$\pi/4$	2	100
航向/下滑	V/UHF	0+	固定	$3\pi+$	1	1
无线电罗盘	$\sim 1.7 \times 10^{-3}$	0+	固定	4π	2	100
信标机	$\sim 75 \times 10^{-3}$	~10	固定	$\pi/4$	1	1

所示。可见,新一代战斗机要求机载天线系统功能上丰富多样,能够覆盖从几兆到几万兆赫兹的频段以及不同的极化和空域。

1.2 国外第四代战斗机的天线布局

美国作为传统的军事强国,其研制的先进第四代战斗机可以说明天线布局的发展趋势。以美国 F-22 战斗机为例,其各种机载天线遍布机体的各个部分,如何在天线系统性能、隐身效果以及气动要求之间寻求合理折衷,对机载天线设计与布局技术提出了新的挑战。图 2 为 F-22 通信/导航/识别系统的天线布局图^[8],图 3 为 F-22 电子战系统的天线布局图^[8]。

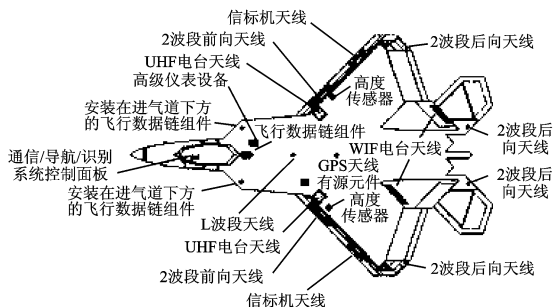


图 2 F-22 飞机通信/导航/识别天线布置图

Fig. 2 Layout of communication/navigation/identification antennas on F-22

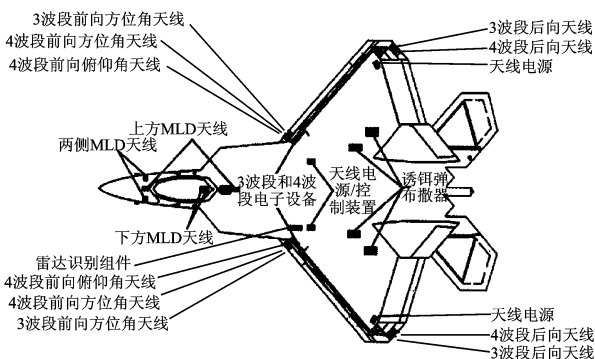


图 3 F-22 飞机电子战天线布置图

Fig. 3 Layout of electronic warfare antennas on F-22

1.3 国外第四代战斗机的天线设计

由表 2 及图 2,3 可以看出,美国的 F-22 战斗机为实现全频段、全空域覆盖和隐身性能的提升,采取了许多技术措施,可归纳如下:

(1)采用宽带天线和频段划分,以实现所需频段的全覆盖;

(2)采用内埋或共形设计,提高隐身性能和降低气动阻力;

(3)采用 Vivaldi 等低散射天线形式降低天线 RCS,提高天线本身的隐身性能;

(4)部分天线采用倾斜安装,合理地设计天线安装倾角可以避免在飞机的主要威胁方向上产生较强的雷达波散射;

(5)天线综合设计,减少天线数量以达到减少散射中心,从而降低由天线产生的散射;

(6)适当的拆分天线和合理的布局设计,可以实现共形和全空域的覆盖。

随着技术研究的进展,新一代战斗机的隐身天线设计和布局将采用更多的先进技术。本文正是针对新一代战斗机机载天线的设计与布局这一应用背景,研究相应的低散射技术方法。

2 低散射设计技术措施

目前国外隐身战斗机(如 F117, B2, F22 等)普遍对机载天线采取了 RCS 减缩措施。F-117 的 RCS 达到 0.025 m^2 左右,显然若不对机载天线十几甚至几十副天线进行 RCS 减缩是难以达到这一指标的。例如,美国在 F-22 项目中对全机天线做了极为细致的设计,通过采用低散射天线、射频综合以及低散射布局等技术措施,实现了隐身、气动以及天线系统性能均佳的效果。目前,天线低散射设计的技术措施主要有以下几种:

2.1 低散射天线形式

低散射天线可以选用频率和极化选择技术^[9]、宽频带天线匹配技术^[10]、天线阻抗加载抵消技术^[11]、天线方向图副瓣控制技术^[12]、吸波材料和吸波结构应用^[13]等技术实现。低散射结构形式的天线可以显著降低单个天线本身的散射。由于飞机上安装有大量天线,其总体减缩效果是明显的。Vivaldi 天线^[14-15](图 4)具有低散射的特征,采用 Vivaldi 天线单元组成的阵列可以改善散射特性。

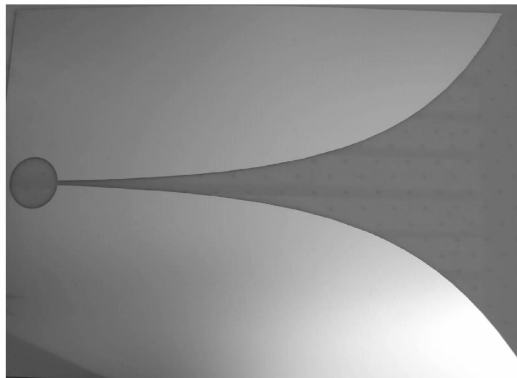


图 4 Vivaldi 天线示意图

Fig. 4 Vivaldi antenna

某机载天线采用低 RCS 设计后,该天线在方向图满足要求的同时,其 RCS 降低到 -50 dBsm

左右,与常规天线相比(RCS ≈ -30 dBsm)降低了20 dB左右^[3]。

2.2 飞机天线布局

机载天线布局中采用共形内埋安装和机体的遮挡等布局技术方案也可有效地降低飞机整体的散射水平。新型飞机为了满足电性能、散射、气动等多方面的要求,在天线的研制过程中大量采用了内埋(图5(b))与飞机共形的形式(图6),因此共形天线的低散射措施研究具有重要意义^[16-18]。

早在1997年,诺斯罗普·格鲁门公司及TRW公司的航空电子系统分公司就联合开发了一种新型天线,即将F/A-18 SRA天线的无线电辐射元件与飞机的尾翼结构相结合,安装在飞机右侧垂直安定面翼尖上。该天线与机体实现电气上及结构上的连接,从而使飞机蒙皮既起结构作用又起天线作用。试飞结果表明,其低频信噪比相对于F/A-18的标准天线明显提高,话频通讯范围增加了4倍。飞机的无线电传输质量也有所改善,由于取消了传统的外露天线,飞机的气动阻力及雷达反

射截面积均可减少,既提高了飞行性能,又改善了隐身性能。

2.3 天线倾斜安装

如同战斗机要进行低RCS外形设计以达到雷达隐身效果一样,机载天线进行RCS减缩,首先要考虑其对主要来波方向倾斜的低RCS设计。一般而言,当入射电磁波垂直于目标表面时,后向散射最强。因此,为了获得较好的隐身效果,应当合理地设计天线安装倾角,从而避免在飞机的主要威胁方向上产生较强的雷达波散射。以典型的U/VHF天线为例,该天线尺寸较大,若采用通常的类似图5(a)的天线形式,例如侧面为长方形,前缘为直线棱边,RCS值较大。针对该天线的低RCS设计可考虑将天线向后和侧向倾斜,如图7所示,F-22战斗机分布将VHF天线埋入左右两侧V尾的前后缘中,则从侧面看成一个倒V形状,因此避免了上述VHF天线在机首和机尾方向上出现强镜面反射。

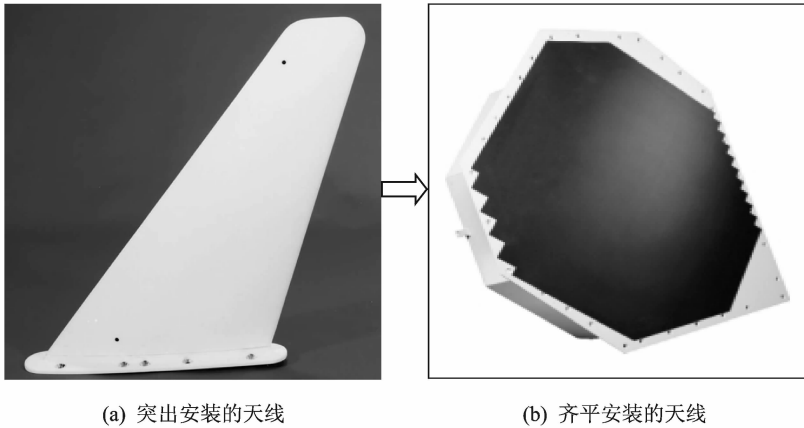


图5 由突出安装优化至天线内埋设计嵌入安装

Fig. 5 Antennas installation from salient type to embedded type

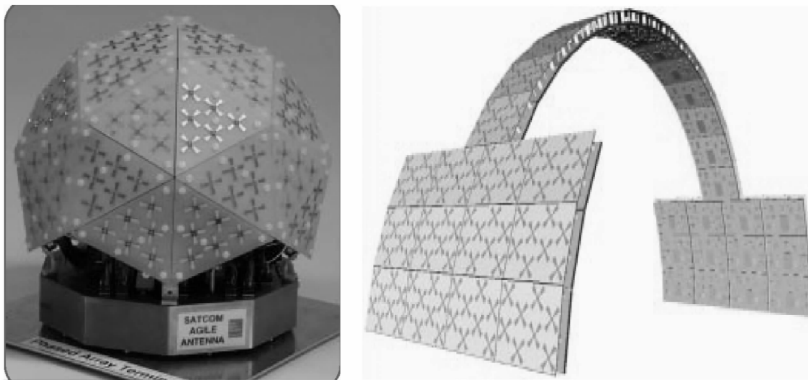


图6 天线与载体共形设计技术

Fig. 6 Design technique of conformal antennas



图 7 VHF 天线倾斜安装于 V 尾中的示意图

Fig.7 VHF antennas slanting installed in tails

经分析和试验,通过采用不同的天线安装形式可获得降低散射的效果:适当的安装位置可使某机载天线 RCS 降低约 10 dB;合适的倾斜角度可使某机载天线 RCS 降低约 5 dB。

倾斜安装天线,可减小天线本身的散射,但同时也会对天线的性能带来一定的降低。进行适当的天线性能和安装倾斜综合设计,可以在满足天线辐射性能的同时有效降低散射特征。

2.4 天线综合

天线综合技术是直接从数量上减少天线散射体,从而达到减少全机天线总 RCS 的一种方式。天线综合的关键技术包括:

- (1) 宽带射频网络技术;
- (2) 多频段相容和分用技术;
- (3) 网络化天线控制技术;
- (4) 波长分路技术;
- (5) 宽带调谐、大动态范围通用接收机技术;
- (6) 开放式的 RF 构形技术;
- (7) 综合天线与飞机共形技术。

采用天线综合技术可将天线在相同的频段进行综合,如图 8 所示^[3],F-35 已将天线设计成宽频

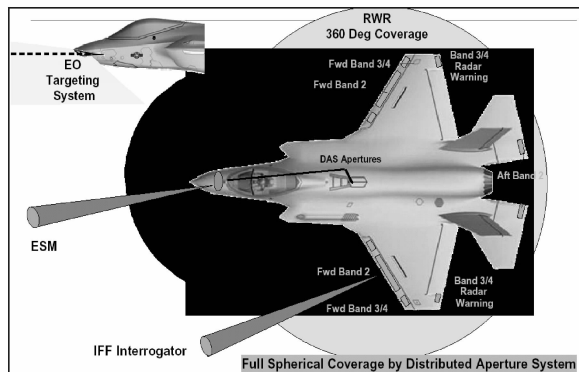


图 8 F-35 飞机天线孔径综合示意图

Fig.8 Integrated antennas aperture of F-35

带天线,并按照 L 波段、2 波段、3 波段和 4 波段进行整合;为满足覆盖空域要求,在不同象限布置同频段的天线;同时,宽带天线为实现不同的功能要求,在时间上进行分割,保证各功能要求。通过这些综合设计,从而减少天线数量,达到减少散射中心的数量,最终实现降低散射水平的要求。

3 结束语

通过对机载天线系统采用上述的技术措施研究,验证了具有有效改善机载天线散射特征的技术方法。得出如下结论:天线本身的低散射设计是最首要的,如采用 Vivaldi 等低散射天线形式,成功的设计可获得 20 dB 左右效果;采用合理的天线布局措施,如适当的安装位置,也可使典型天线散射特征降低 10 dB 左右;合适的倾斜角度也可使典型天线散射降低 5 dB 左右。尽管适当的倾斜天线可减小天线本身的散射,但同时也会对天线的方向性图和极化造成一定的偏转,导致天线性能一定的降低。因此,在进行天线布局中必须全盘考虑,从而选择较优的布局。

参考文献:

- [1] U S Defense Science Board Joint U S Defense Science Board, UK Defense Scientific Advisory Council. Task force on defense critical technologies [R]. ADA446196, 2006.
- [2] Jerome I. Glaser stealthy antennas-minimizing the radar cross section of an essential communication system component[J]. The WSTIAC Quarterly, 2008,8 (2):11-14.
- [3] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京:航空工业出版社,2013.
- [4] 宋国栋,潘宇虎. 高铁阵列天线 RCS 分析及减缩[J]. 现代雷达,2008,30(10):67-70.
Song Guodong, Pan Yuhu. Gao tie analysis and reduction of array antenna RCS[J]. Modern Radar, 2008,30(10):67-70.
- [5] 孙聪,张澎. 先进战斗机对机载射频孔径系统隐身的需求及解决方案[J]. 航空学报,2008,29(6):1472-1481.
Sun Cong, Zhang Peng. LO requirements and solutions of aviation /RF system for advanced aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6):1472-1481.
- [6] 车海林,何嘉航. 飞机雷达天线系统隐身技术研究[J]. 飞机设计,2009,29(6):35-39.
Che Hailin, He Jiahang. Research on stealth technol-

- ogy of aircraft radar antenna system[J]. *Aircraft Design*, 2009,29(6):35-39.
- [7] 洪涛. 天线雷达截面控制技术[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.
- Hong Tao. Research on the control of antenna radar cross section[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [8] 付盛杰, 张文俊, 柏临南, 等. F-22“猛禽”典型第四代战斗机[M]. 北京:蓝天出版社, 1999.
- [9] Wu T K. Four-band frequency selective surface with double square loop patch elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994,43(12):1659-1663.
- [10] Rodriguez J L, Garcia Tunon I, Taboada J M, et al. Broadband HF antenna matching network design using a real-coded genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007,55(3):611-618.
- [11] Gustafsson M. RCS reduction of integrated antenna arrays and radomes with resistive sheets[C]//*IEEE International Symposium in Antennas and Propagation*. [S.l.]: IEEE, 2006:3479-3482.
- [12] 陈国海. 先进战机多功能相控阵系统综合射频隐身技术[J]. *现代雷达*, 2007,29(12):1-4.
- Chen Guohai. General RF stealth of airborne multi-function phased array systems[J]. *Modern Radar*, 2007,29(12):1-4.
- [13] Peiheng Z, Liru H, Xie J, et al. A study on the effective permittivity of Carbon/PI honeycomb composites for radar absorbing design[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012,60(8):3679-3683.
- [14] Geer Teni, Zhang Ning, Qiu Jinghui, et al. Research on a novel miniaturized antipodal vivaldi antenna with improved radiation[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013(12):417-420.
- [15] Ludlow P, Fusco V F. Antipodal vivaldi antenna with tuneable band rejection capability[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2010,5(3):372-378.
- [16] Josefsson L, Persson P. Conformal array antenna theory and design[M]. Wiley: IEEE Press, 2006.
- [17] Thors B, Josefsson L. Radiation and scattering trade-off design for conformal arrays [J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2003,51(5):1069-1076.
- [18] 李海林, 周建江, 谭静, 等. 圆柱相控阵天线的功率分级和极化控制[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013,45(3):410-415.
- Li Hailin, Zhou Jianjiang, Tan Jing, et al. Radiated power classification and polarization control of cylindrical phased array antenna[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013,45(3):410-415.