

文章编号 1005-0388(2008)03-0545-05

# 高频段飞机目标 RCS 分析

伍光新<sup>☆</sup> 邓维波 姜维 张森 王涛

(哈尔滨工业大学电子工程技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 在高频波段飞机目标雷达散射截面研究中, 存在因建模不够精确, 而导致的结果偏差较大的问题。针对此问题采用矩量法详细分析了在建模时飞机各主要部件的尺寸变化对 RCS 造成的影响, 指出了建模中需要注意的问题。对建模计算结果和实测结果进行了对比, 验证了方法的有效性。基于对战斗机目标散射截面计算结果的分析和对比, 提出了该类飞机目标 RCS 估计的经验公式, 利用多类目标的结果验证了经验公式的有效性并给出了经验公式的估计精度。

**关键词** 飞机目标建模; 雷达散射截面分析; 经验公式

中图分类号 TN011 文献标志码 A

## Analysis of airplane RCS at high frequency band

WU Guang-xin DENG Wei-bo JIANG Wei ZHANG Sen WANG Tao

(Research Institute of Electronics Engineering HIT, Harbin Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** Rough target modeling induces unnecessary error of airplane target radar cross section (RCS) at high frequency band. To solve this problem, precise modeling were method adopted and method of moments (MoM) was used in RCS calculation. Influence of main model size change on RCS was analyzed. Contributions of each part of aircraft to RCS were investigated. Calculation results were compared with measured RCS. Then good agreement was obtained which indicted the method used to obtain RCS was validaty. Fighter RCS estimation empirical formula was presented and validated by some targets of the same type, and its estimation precision was also given.

**Key words** airplane target modeling; RCS analysis; empirical formula

## 1 引言

高频频地波超视距雷达系统利用垂直极化电磁波在海面绕射传播的特性, 探测远距离的海上舰船、低空飞行的飞机、洋流、冰山等目标<sup>[1,2]</sup>。而运动速度很快的低空飞行的中小型飞机目标(轰炸机目标和战斗机目标), 是高频频地波超视距雷达必需早期发现的重要威胁目标。因此, 在高频段对飞机目标 RCS 进行估算具有十分重要的意义。

针对高频段飞机目标 RCS 特点, Trueman, C.

W. 等人通过线段网格建模方法, 用 MoM 计算了 4 种类似飞机机身的柱状目标在高频段的散射特性<sup>[3]</sup>以及柱状机身附带的天线对 RCS 的影响<sup>[4]</sup>, 通过表面电流的分布粗略解释了计算结果。比较了用 MoM 计算的类似飞机目标的简单模型的 RCS 和暗室测量 RCS<sup>[5]</sup>。用 MoM 和 FDTD 方法计算了类似飞机结构目标和一种小型飞机目标的 RCS<sup>[6]</sup>。David, A. 等人在文献[7]使用 MoM 计算了一种民用飞机的 RCS, 并且比较了仿真的结果和暗室缩比模型试验结果。虽然都是用数值手段对模型进行计

算,以上研究中却没有使用比较精细的模型,甚至使用的是类似飞机目标的模型。因而没有就模型对计算结果的影响给出分析;缺乏对高频段飞机目标的RCS计算结果的详细分析、总结和验证。

对轰炸机目标(Beagle)和战斗机目标(Fulcrum)进行细致的建模和三角面元剖分,计算了垂直极化波入射条件下的高频段目标RCS。分析RCS对于机身长度、高度以及机翼宽度变化的敏感程度。同时详细研究了飞机各主要部件对RCS的影响和贡献。然后利用实测RCS验证了建模计算结果的准确性。基于Fulcrum飞机目标的RCS分析结果,提出了该类目标RCS估计的经验公式,同时利用多种该类目标的RCS计算结果验证了经验公式的有效性,并给出了经验公式的估计精度。

## 2 RCS计算与分析

### 2.1 整体RCS的分析

图1所示的是一种中型飞机Beagle的几何模型和三角面元模型,模型的建立借助于有限元软件实现。对模型的计算采用矩量法,考虑到矩量法在研究电小尺寸问题时所具备的精度较高,内存要求不高,计算时间不长等特点<sup>[8,9]</sup>。

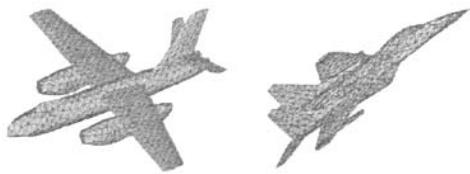


图1 Beagle 和 Fulcrum 三角剖分模型

(注:垂直极化电磁波;入射方向1——迎头入射,入射方向2——尾部入射,入射方向3——前侧面45°角入射)

为了分析哪个方向上的尺寸对目标RCS贡献最大,分别对两种模型的长宽高三个方向分别进行了拉伸修改建模,然后进行计算,计算结果见图2和图3。图中实线是标准模型结果,虚线是修改后的模型结果。

从图2可以看出:对于Beagle模型,高度方向拉伸1.2倍前向和后向入射的RCS平均增加了4.1 dB,模型长度方向拉伸1.2倍前向和后向入射的RCS平均增加了1.1 dB,而模型宽度方向拉伸1.2倍后向RCS平均只增加了0.62 dB。Fulcrum飞机的RCS增加分别为3.4 dB,0.5 dB和0.4 dB左右。由计算结果可知:高度方向尺寸对目标RCS影响最

大,宽度方向尺寸影响最小,而长度和宽度方向尺寸变化导致了目标的谐振特性变化。因为入射电磁波的是垂直极化波,飞机高度方向和电磁波极化方向一致。当目标高度变大以后,沿极化方向的电尺寸变大,激励产生的表面电流增大,故飞机目标的RCS明显增大。目标的谐振特性与目标的特征尺寸密切相关。高度和宽度方向的拉伸改变了特征尺寸的大小,而当目标的特征尺寸变大时,其谐振频率会变小;1.2倍的拉伸对目标的结构改变并不大,相当于目标模型整体放大为原来的1.2倍,对应的RCS曲线在频率轴上表现为同比压缩。

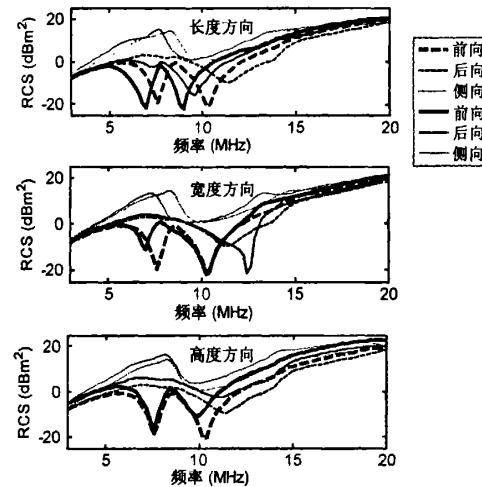


图2 Beagle 三个方向尺寸变化对目标RCS的影响

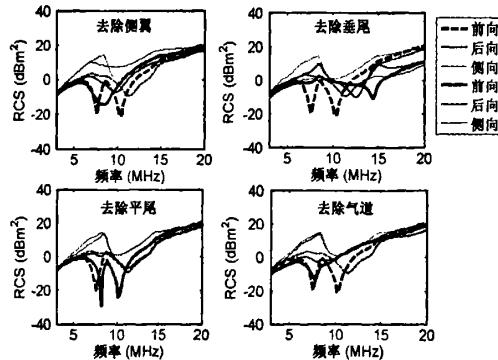


图3 Beagle 机翼对 RCS 影响

### 2.2 强散射源对目标RCS的贡献

飞机翼类部件是决定飞机雷达散射特性的重要散射源,包括侧翼、垂尾与平尾。以下分别研究这三种翼类部件对RCS的影响。

图3是Beagle飞机有无侧翼、垂尾、平尾和进气道的目标RCS比较结果。从图中可以看出,侧翼

对 RCS 影响的基本集中在频段的中部,更准确地说是在谐振部分,改变了目标的谐振特性,而在频段的高端与低端影响都比较小。显然有无机翼情况下目标特征尺寸的很大变化,导致谐振特性变化;而目标结构上的很大变化,导致谐振特性变化不如略微拉伸目标的宽度所造成的变化规律明显。从图中还可以看出垂尾对目标 RCS 的影响非常大。在频段的中部,整个谐振特性发生了很大的变化;在频段的高端,没有垂尾的存在情况下,RCS 减小 10 dB 左右。其原因和前面高度方向拉伸所造成的变化原因一致。只有在频段低端很小的范围内,由于 RCS 处于瑞利区,有无垂尾差别不大。而在三个入射方向上,有无平尾的 RCS 曲线都比较接近,仅谷点略有变化。

通过分析可知:垂尾对目标 RCS 的贡献最大,改变目标 RCS 的大小和谐振特性。侧翼影响次于垂尾,主要改变目标的谐振特性。平尾的影响最小。因而在建立模型的时候,需要特别注意对 RCS 贡献较大的部分精确建模。

高频波段,飞机引擎和气道长度一般要小于波长。单就这类部件本身而言,其散射面积是很小的。但是作为整个飞机目标的一部分,它会对目标的 RCS 产生较大影响。在图 3 中前向与后向入射两种情况下,没有气道存在时,RCS 的谷点位置发生变化,谷点值普遍提高。在侧向,气道的影响很小。这是因为侧向入射时,机身与翼类部件才是主要的散射源,气道的贡献所占比重很小。而气道的细节不是很重要,气道是否封闭,对 RCS 的影响非常小(具体结果见图 4),这一结论完全不同于微波段。因为进气口尺寸相对于高频段入射电磁波的波长来说实在是太小了。

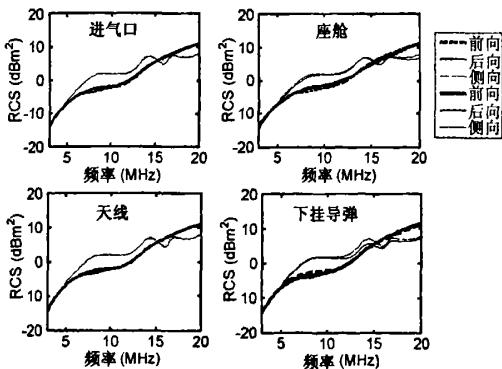


图 4 Fulcrum 进气口对 RCS 影响

### 2.3 弱散射源的贡献

座舱一般为玻璃结构,但是为了建模与计算方

便对它们采用金属化处理。为了分析座舱的贡献,我们在原模型上“削去”座舱凸起,然后计算目标 RCS,最后再与原来的模型进行比较。从图 4 中可以看出,无论是在前向还是在后向,座舱对目标 RCS 的影响都非常小。

Fulcrum 前端有一根细天线,为了分析其影响,分别在有无天线情况下计算目标 RCS,具体的结果见图 4。由图可知,无论是在前向后向还是侧向,因天线总是垂直于极化方向,激励出的电流极小,所以有无天线对 RCS 的影响都很小,因此若仅需要计算垂直极化波的目标 RCS,建模时甚至可以不予考虑。

导弹用一根小方体建模,挂于机侧翼下方(见图 1)。导弹的尺寸要小于气道,由前面的分析可知用方体建模完全可以说明问题。有无导弹两种情况下目标 RCS 计算结果见图 4。导弹是飞机目标上的弱散射源,建模时可以去掉下挂导弹等细棍状细节,这样就可以减少建模精度,同时计算精度也不会受到影响。

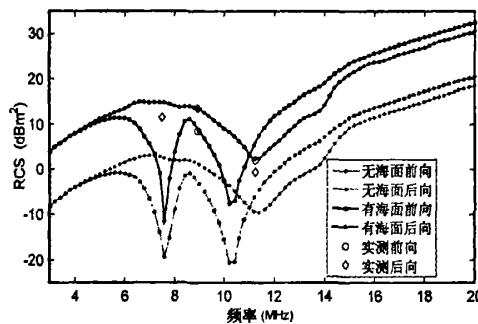


图 5 计算和实测 RCS 的比较

### 3 RCS 验证分析

为了对比计算和实测结果,首先需要考虑海面对目标 RCS 的影响,在计算中将海面等效为无限大导体平面考虑,忽略了海面不平整的影响。图 5 中实线表示的是飞行在海平面上 100 m 时目标 Beagle 在 3~20 MHz 频段内的计算 RCS,虚线表示的是自由空间的目标计算 RCS。可以看出在海平面上低空飞行的目标,目标回波强度大大增加。海平面的镜面效应影响在计算和实测 RCS 的比较时是不容忽视的。高频地波超视距雷达实验系统测试的飞行在离海面高度为 100 m 左右的该飞机的 RCS 结果也显示在图 5 中。圆圈和正方形图标表示的是在某些频率点上实测的 RCS 结果。实际测量是在 3

个雷达工作频率点上进行的。在这 3 个雷达工作频率点上计算和实测结果是大致吻合的。二者也会存在一定的偏差,但测量和计算都不可避免的存在一些误差。在第一个工作频率上雷达没有发现目标,所以未能获得该飞机的 RCS 数据,而在计算中,发现了该频率在雷达目标 RCS 曲线的谷点附近。所以目标的回波比正常的尾部入射情况下小了近 25 dB 左右。这也揭示了为什么雷达没能够捕获到飞机目标。

#### 4 RCS 估算经验公式

在研究高频段飞机目标的 RCS 的过程中,发现类似于 Fulcrum 飞机这样的战斗机目标 RCS 具有相同的变化规律。从图 3 中可以看出 Fulcrum 飞机目标在 3~20 MHz 范围内,前向和后向入射 RCS 变化很小;并且随着频率上升基本呈现直线逐步上升趋势,尤其是经过低端的瑞利区以后,在高端更加清晰。战斗机目标的瑞利区 RCS 根据目标的基本尺寸可以进行比较准确的估计。而在谐振区该类复杂目标的 RCS 的估计目前仍然没有较为简单且行之有效的方法。通过分析可以发现在图 4 中寻找一条斜上升的直线可以很好地近似该目标的 RCS 计算结果。大量仿真计算和实际测试的结果都表明飞机目标高度和机身长度对其 RCS 有较大的影响。对高频段战斗机目标 RCS 数据的分析可以获得如下经验公式

$$\hat{\sigma}(f) = (0.2l + 0.8h)(f - f_0) + \sigma_0 \quad (1)$$

式中,  $f$ —频率;  $f_0$ —基本频率;  $\sigma_0$ —基本频率对应的目标 RCS;  $\hat{\sigma}(f)$ —需要估算的目标 RCS;  $l$ —机长;  $h$ —机高。一般基本频率都可以取 5 MHz 左右,其对应的 RCS 可以通过以下瑞利区的 RCS 估计方法估算。该经验公式对前后向入射的 RCS 都有效。

为了证明该经验公式的有效性,通过计算不同外型的战斗机目标来进行验证。选取了 8 种现役战斗机目标进行 RCS 的计算和估算,并且比较了二者的差别。图 6 画出了其中 4 类目标由计算软件计算的前后向 RCS 和采用公式(1)估算得到的前后向 RCS 的比较结果。图中实线表示计算结果,虚线是公式(1)估算结果。可以看出公式(1)估算的结果同实际计算得到的结果是比较吻合的。图 7 给出了这 8 类飞机目标 RCS 估算的平均误差。可以得出结论,估算的 RCS 在 3~5 MHz 范围内小于仿真计算结果,并且随着频率变高,目标的 RCS 估算更加准确。在 5~20 MHz 范围内,平均估算精度基本可以

控制在 2 dB 以内。

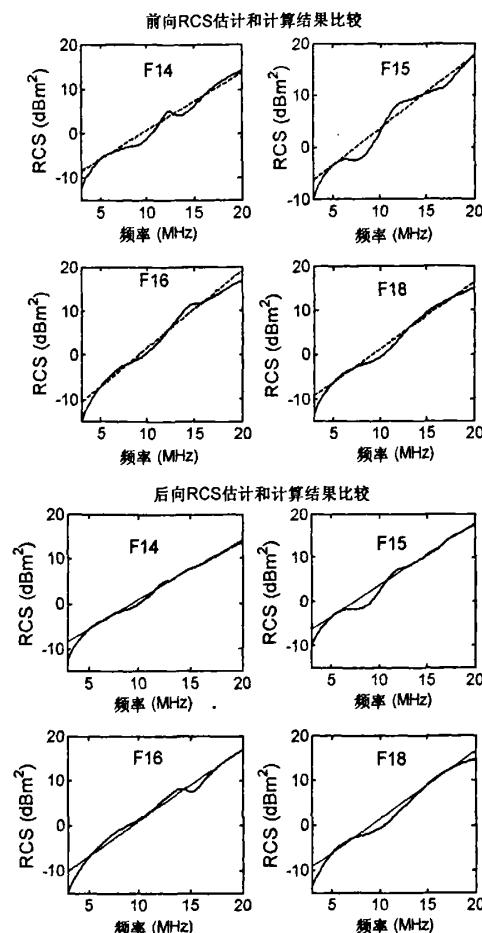


图 6 RCS 前后向计算结果和估算结果的比较

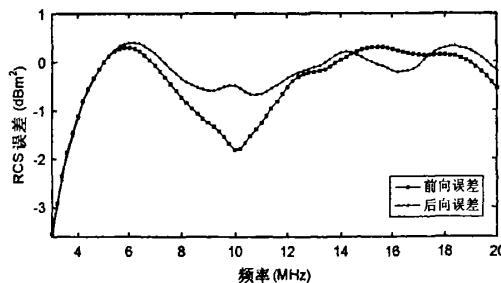


图 7 RCS 估算误差

#### 5 结论

通过对飞机目标计算结果的分析,得到了如下结论:飞机高度尺寸对目标 RCS 影响很大,机身长度方向尺寸次之;宽度方向尺寸影响较小。机翼类部件与气道部件是飞机目标的强散射源。翼类部件

中以垂尾对 RCS 影响最大,气道部件的进气口是否封闭对 RCS 影响很小。座舱、天线与下挂导弹等部件是目标的弱散射源。通过比较飞机目标的 RCS 测量结果和仿真计算结果,验证了利用矩量法计算高频段飞机目标散射特性的有效性。另外,研究了战斗机目标的前后向 RCS 在 3~20 MHz 范围内的基本变化规律,并给出了基本的经验估算公式以及估算的精度。

## 参考文献

- [1] L Sevgi, A Ponsford, H C Chan. An integrated maritime surveillance system based on high-frequency surface-wave radar, Part 1: theoretical background and numerical simulations [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2001, 43(4):28-43.
- [2] A Ponsford, L Sevgi, H C Chan. An integrated maritime surveillance system based on high-frequency surface-wave radar, Part 2: operational status and system performance [J]. IEEE Antennas and Propagation Mag, 2001, 43(5): 52-63.
- [3] C W Trueman, S L Kubina, S R Mishra and C Larose. RCS of four fuselage-like scatterers at HF frequencies[J]. IEEE Trans on AP, 1992, 41(4): 236-240.
- [4] S R Mishra, C Larose, and C W Trueman. RCS of resonant scatterers with attached wires [J]. IEEE Trans on AP, 1993, 42(3): 351-354.
- [5] C W Trueman, S L Kubina, S R Mishra, et al.. Radar cross-section of a generic aircraft at HF frequencies [J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 1993, 21(3): 59-64.
- [6] C W Trueman, S L Kubina, S R Mishra, et al.. HF RCS of small aircraft by computation and by measurement [C]. Proceedings of International Symposium on Antennas, Nice, France, 8-10 Nov. 1994: 258-261.
- [7] A David, C Brousseau, and A Bourdillon. Simulations and measurements of a radar cross section of a Boeing 747-200 in the 20~60 MHz frequency band [J]. Radio Science, 2003, 38(4): 31-37.
- [8] 王军,聂在平,胡俊,等.复杂目标电磁散射特性分析中的几何建模[J].电波科学学报,2003,18(1):70-74.  
Wang J, Nie Z P, Hu J, et al.. Geometry construction rules of complex object's electromagnetic scattering analysis[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18 (1):70-74.
- [9] 项春旺,童创明,耿方志等.复杂目标降维建模方法及其在电磁散射中的应用[J].电波科学学报,2005,20 (2):189-192.  
Xiang C W, Tong C M, Geng F Z, et al.. Modeling method of decreased dimension for complex targets and its application in electromagnetic scattering analysis [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20 (2): 189-192.

伍光新 (1980—),男,江苏人。现为哈尔滨工业大学电子工程系技术研究所博士生。主要感兴趣的研究方向:雷达目标特性、雷达目标识别等。



邓维波 (1961—),男,黑龙江人,博士。现为哈尔滨工业大学电信技术研究院教授,博士生导师。主要从事天线,电磁场及电波传播等方面的研究。



E-mail: dengweibo@hit.edu.cn

姜维 (1981—),男,重庆人,现为哈尔滨工业大学电子工程系技术研究所博士生。主要感兴趣的研究方向:雷达抗干扰,电磁场散射特性等。



## 雷达散射截面（RCS）分析培训课程

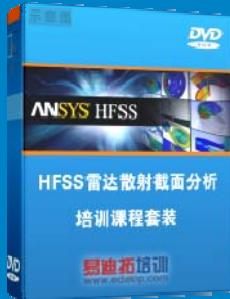
易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

---

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

---

### ● 更多培训课程：

#### ● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

#### ● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

#### ● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>