基于 MLFMA 的飞行器锯齿边板散射特性分析

刘战合 黄沛霖 武 哲 高 旭

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100083)

摘 要：为精确求解散射问题，采用混合场积分方程、多层快速多极子算法(MLFMA，Multilevel Fast Multipole Algorithm)和共轭梯度算法的迭代技术，并改进了多极子模式数. 金属球双站雷达散射截面(RCS，Radar Cross Section)的算例表明，该方法在保证精度的前提下，降低了内存和计算时间；分析了锯齿边板的电磁散射特性，总结了锯齿边板相对于直边板在不同角域内的 RCS 减缩特性以及 RCS 减缩与入射频率变化之间的关系；随着入射频率的增高，RCS 减缩效果迅速提高，且垂直极化减缩效果较水平极化减缩效果好. 该结论可以用来提高飞行器的隐身性能.

关 键 词：多层快速多极子算法；电磁散射；雷达散射截面

中图分类号：V 218

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)05-0499-04

Analysis of scattering from serrated edge plate on aircraft with MLFMA

Liu Zhanhe Huang Peilin Wu Zhe Gao Xu

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Combined field integral equation (CFIE), multilevel fast multipole algorithm (MLFMA) and conjugate grads method(CGM) were employed, and a modified truncation number had been presented to gain the precise scattering from objects efficiently and stably. It was exemplified that this new method could reduce memory and computation time at the same accuracy by its application to the bistatic radar cross section (RCS) of sphere. Scattering from serrated edge plates was analyzed. The problem how the RCS reduction of serrated edge plate changes against straight edge plate was discussed in different angle range. The connection between the RCS reduction and incident frequency was also discovered. Results show that the RCS reduction of serrated edge plate increases sharply when the incident frequencies become larger, the RCS reduction effect in vertical polarization is greater than that in horizontal polarization. This conclusion can find its application to improve the stealth performance of aircraft.

Key words: multilevel fast multipole algorithm; electromagnetic scattering; radar cross section (RCS)

高频雷达散射截面(RCS，Radar Cross Section)计算由于计算时间和所需内存的限制，长期依赖近似计算方法，20 世纪 90 年代以来，飞行器 RCS 数值模拟取得了很大进步，多层快速多极子算法(MLFMA，Multilevel Fast Multipole Algorithm)[1]使矩量法应用于高频电磁散射成为可能. 基于 MLFMA，国内文献[2]开发了三维矢量电磁散射分析的数值程序；国外文献[1]开发出了 FISC (Fast Illinois Solver Code)软件. RCS 减缩对飞行器隐身设计具有重要意义[3]，国外隐身飞机如 B2 均采用锯齿形外形隐身设计. 本文采用

收稿日期：2007-04-19

基金项目：武器装备预研基金重点项目(6140510)

作者简介：刘战合(1977—)，男，陕西富平人，博士生，nwpulzh@163.com.

改进的多极子模式数 MLFMA 对锯齿边板进行了计算研究，总结了锯齿边相对于直边 RCS 减缩的频率响应关系.

1 混合场积分方程

通常情况下飞行器可以视为金属散射体，所以仅研究均匀介质区域的表面积分方程. 假设散射体表面感应电流 J_s、表面感应磁流 M_s、激励源 J 和 M 都为已知，介质常数为 ε 和 μ.

基于矩量法的三维闭合导体目标矢量散射的表面电场积分方程(EFIE，Electric Field Integral Equation)如下：

$$\hat{\boldsymbol{t}} \cdot \int_S \mathrm{d}\boldsymbol{S}\left[J(\boldsymbol{r}') + \frac{1}{k^2}\nabla' \cdot J(\boldsymbol{r}')\nabla\right] g(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}') = \frac{4\pi \mathrm{i}}{k\eta}\hat{\boldsymbol{t}} \cdot E^{\mathrm{inc}}(\boldsymbol{r}) \qquad \boldsymbol{r} \in \boldsymbol{S} \tag{1}$$

其中，$\hat{\boldsymbol{t}}$ 为散射体表面任意单位切向量；$\boldsymbol{S}$ 为散射体表面；$\boldsymbol{r}'$ 为散射体表面积分矢量；k 为入射波数. 等式左边的表面感应电流 $J(\boldsymbol{r}')$ 是未知量，而等式右端为含已知入射电场的激励项 $E^{\mathrm{inc}}(\boldsymbol{r})$，标量格林函数 $g(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}') = \mathrm{e}^{\mathrm{j}k|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'|}/|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'|$.

表面磁场积分方程(MFIE，Electric Field Integral Equation)如下：

$$2\pi J(\boldsymbol{r}) - \hat{\boldsymbol{n}} \cdot \nabla \cdot \int_S \mathrm{d}\boldsymbol{S}' g(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}') J(\boldsymbol{r}') = 4\pi \hat{\boldsymbol{n}} \cdot H^{\mathrm{inc}}(\boldsymbol{r}) \tag{2}$$

其中，$\hat{\boldsymbol{n}}$ 为散射体表面单位法向矢量；$H^{\mathrm{inc}}(\boldsymbol{r})$ 为已知入射磁场激励项.

混和场积分方程(CFIE，Combined Field Integral Equation)实际上是电场积分方程和磁场积分方程的线性组合[4]. 表达式可写为

$$E_{\mathrm{CFIE}} = \alpha E_{\mathrm{EFIE}} + \frac{\mathrm{i}}{k}(1-\alpha) E_{\mathrm{MFIE}} \tag{3}$$

式中，E_{EFIE} 为表面电场积分方程；E_{MFIE} 为表面磁场积分方程；α 为混合积分场组合系数，根据实际情况可选择 0～1 之间的任何数.

2 MLFMA 基本原理及其改进

三维散射问题的快速多极子方法(FMM，Fast Multipole Method)的数学基础主要是利用球面波的加法定理对积分方程中的格林函数进行处理. 可将表面积分方程转化为如下矩阵方程[3]：

$$\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{A}_{ji} a_i = \sum_{n \in G_{\mathrm{N}}} \sum_{i \in G_n} \boldsymbol{A}_{ji} a_i + \frac{\mathrm{i}k}{4\pi} \int \mathrm{d}^2 \hat{\boldsymbol{k}} \boldsymbol{V}_{\mathrm{fmj}}(\hat{\boldsymbol{k}}) \cdot \sum_{n \in G_{\mathrm{F}}} \alpha_{mn}(\hat{\boldsymbol{r}}_{mn} \cdot \hat{\boldsymbol{k}}) \sum_{i \in G_n} \boldsymbol{V}^{*}_{\mathrm{sni}}(\hat{\boldsymbol{k}}) a_i \qquad j \in G_m \tag{4}$$

其中，$\boldsymbol{A}$ 为稀疏矩阵；$\hat{\boldsymbol{k}}$ 为角谱积分矢量；α_{mn} 为转移因子；G_{N} 为来自该组的近区组的贡献；G_{F} 代表来自该组的远区组的贡献；$\boldsymbol{V}_{\mathrm{sni}}(\hat{\boldsymbol{k}})$，$\boldsymbol{V}_{\mathrm{fmj}}(\hat{\boldsymbol{k}})$ 分别为聚合因子、解聚因子. 具体表达如下：

$$\boldsymbol{V}_{\mathrm{sni}}(\hat{\boldsymbol{k}}) = \int_S \mathrm{d}\boldsymbol{S}' \mathrm{e}^{\mathrm{i}\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}_{in}} [\bar{\boldsymbol{I}} - \hat{\boldsymbol{k}}\hat{\boldsymbol{k}}] \cdot \boldsymbol{j}_i(\boldsymbol{r}_{in}) \tag{5}$$

$$\boldsymbol{V}_{\mathrm{fmj}}(\hat{\boldsymbol{k}}) = \alpha \int_S \mathrm{d}\boldsymbol{S} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}_{jm}} [\bar{\boldsymbol{I}} - \hat{\boldsymbol{k}}\hat{\boldsymbol{k}}] \cdot \boldsymbol{t}_j(\boldsymbol{r}_{jm}) - (1-\alpha)\hat{\boldsymbol{k}} \cdot \int_S \mathrm{d}\boldsymbol{S} \mathrm{e}^{\mathrm{i}\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}_{jm}} \boldsymbol{t}_j(\boldsymbol{r}_m) \cdot \hat{\boldsymbol{n}} \tag{6}$$

$$\alpha_{mn}(\hat{\boldsymbol{r}}_{mn} \cdot \hat{\boldsymbol{k}}) = \sum_{l=0}^{L} \mathrm{i}^l (2l+1) h_1^{(1)}(\boldsymbol{k}\boldsymbol{r}_{mn}) P_l(\hat{\boldsymbol{r}}_{mn} \cdot \hat{\boldsymbol{k}}) \tag{7}$$

式中，L 为多极子模式数；$\boldsymbol{j}$ 为基函数；$\boldsymbol{t}$ 为权函数. 对传统的 MLFMA，在最细层，L 由以下公式计算[5]：

$$L = kD_{\max} + 1.8(d_0)^{2/3}(kD_{\max})^{1/3} \tag{8}$$

$$D_{\max} = \sqrt{3} D_{\mathrm{cube}}$$

式中，D_{cube} 为立方体边长；d_0 为计算精度. 由于采用的分组方法，L 由最细层向粗层逐层以 2 倍递增，此时角谱空间积分样点 $K = 2L^2$ 以 4 倍递增，引起内存大量增加. 文献[6]将 $L = kD_{\max} + \ln(kD_{\max} + \pi)$ 应用到每层中，可大大降低内存使用，但其精度稍差. 本文当该层分组立方体边长小于 4λ 时，将式(8)直接应用，而当边长大于 4λ 时，为了保证精度，L 以 2 倍递增，处理后由于积分采样点的降低，可较大降低内存使用.

经过多层快速多极子处理，原来的积分方程求解变为线性代数方程组的求解问题，采用迭代方法中的共轭梯度算法来求解该方程组.

3 导体球双站 RCS 计算验证

采用混合场积分方程，利用 MLFMA，计算金属球 $ka = 10\pi$，其中 a 为金属球半径，入射电磁

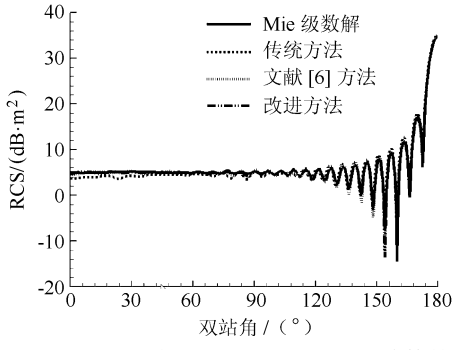


图 1 金属球 RCS 双站 MLFMA 计算结果与 Mie 级数解对比

波频率为 1.5 GHz,图 1 是导体金属球双站 E 平面 RCS 计算结果,分别使用了 Mie 级数方法、传统方法、文献[6]方法、改进 MLFMA 方法的解.采用原始的计算模式数 L 方法,使用内存 1.1 GB,CPU 计算时间 43 388 s,未知数目 $N=106\,045$个,最细层立方体边长 $D_{\text{cube}}=\lambda/2$,$\alpha=0.5$,迭代收敛误差限 0.01;而采用改进的模式数 L 计算时,占用内存 257.7 MB,CPU 计算时间 4 246 s,式(8)中 $d_0=2$.两种方法使用共轭梯度法迭代皆为 26 次.图 1 中,传统方法、文献[6]方法、改进方法计算结果与精确 Mie 级数解的均方根误差分别为0.935 dB,0.417 dB,0.326 dB,改进方法吻合最好,说明本程序实现了电大散射体的 RCS 求解.图 2 表示两种方法 K 随层数的变化趋势对比,可以看出,改进方法在第 0,1,2,3,4 层的采样点数较传统方法有较大降低,因此降低了内存使用量,同时减少了计算时间.

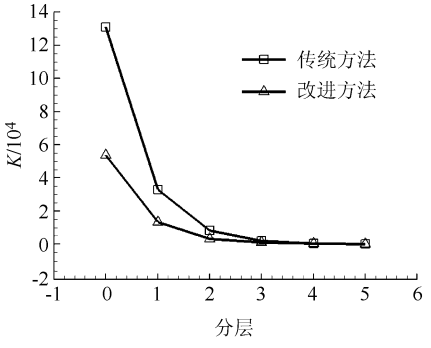


图 2　K 改进前后对比

4　锯齿边减缩特性分析

4.1　数值结果分析

锯齿边板计算模型如图 3 所示,锯齿顶角角度为 114°(对应后掠角 33°),定义入射角 0°和 180°,入射方向 90°为垂直于平板表面方向,按俯仰角变化计算单站 RCS.对应直边板为图 3 中截去虚线左端锯齿后剩余部分,计算状态定义同锯齿形板.

计算频率分别为 1,3,6,10 GHz,内存分别为 33,43,76,185 MB,$d_0=2$,$\alpha=0.5$,迭代收敛误差限 0.01.由于其它频率下的 RCS 曲线规律和 10 GHz相同,所以仅列出 10 GHz 时曲线,图 4、图 5 分别为频率为 10 GHz,水平、垂直极化下锯齿边板和对应直边板 RCS 计算曲线图.图 4 表明水平极化下直边板在 0°～60°时曲线较为平缓,主要表现为对应直边板的散射;从 60°开始镜面散射逐渐占重要作用,直至 90°达到峰值;90°～150°内的变化与 90°左侧呈对称趋势,但在 150°后 RCS 值迅速降低,这是由两条 90°边的散射导致的.对于锯齿边板,曲线值较直边板低,并在 0°～60°和 120°～180°角域内振荡,分析可知振荡是 5 个锯齿的耦合作用引起的,而且锯齿不止影响在其本身一侧的散射情况,也作用于平板的另一侧.对于垂直极化,图 5 表明,在 0°～60°时曲线较水平极化平缓,主要表现为对应直边板的作用,90°以后呈逐渐下降趋势,此时为两条直边贡献.锯齿边板的 RCS 除在 90°附近和直边板一致,这是镜面散射结果;在其余角域内均比直边板低,且有振荡现象,表明垂直极化锯齿边耦合散射比水平极化时强烈.

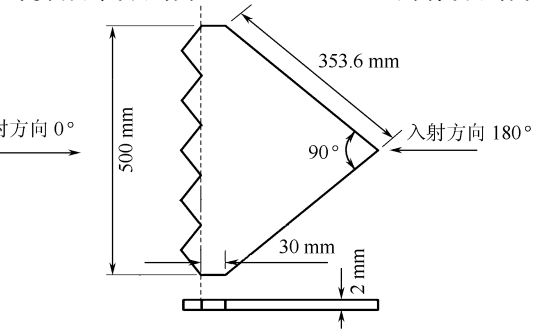


图 3　锯齿板计算模型示意图

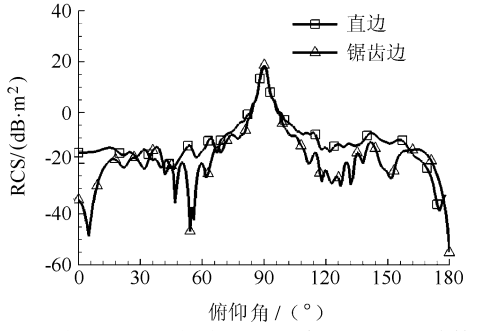


图 4　水平极化下锯齿边板和直边板 RCS 计算结果

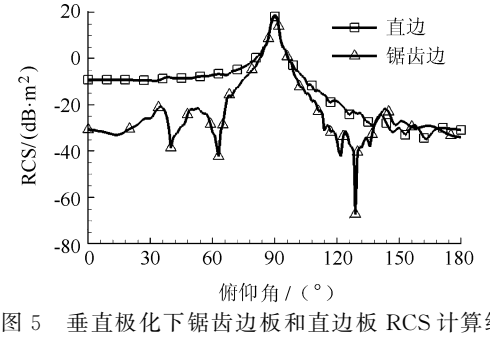


图 5　垂直极化下锯齿边板和直边板 RCS 计算结果

表 1 为锯齿边板相对于直边板的 RCS 几何均值减缩值,图 6、图 7 分别是水平、垂直极化下锯齿边板对于直边板在不同角域内的 RCS 均值减缩随频率变化曲线,由图 6、图 7 和表 1 可以看出,当频率为 1 GHz 时,锯齿边板减缩效果不很明显;但当频率大于 1 GHz 时,在 0°～180°内

RCS减缩效果均随着频率的增大而迅速增加.其中80°～100°角域内RCS减缩随频率增大逐渐增加的趋势相对较慢,分析可知在80°～100°内散射主要表现为镜面散射;6GHz以内锯齿板RCS甚至高于直边板,这是因为锯齿边板比直边板多出5个锯齿的镜面散射面积;其余角域内减缩比较强烈,可知锯齿相互耦合作用较明显,且随着频率的增大,耦合更加强烈,减缩效果更大.图6、图7和表1还表明垂直极化减缩结果较水平极化减缩结果明显.

表1 锯齿边板水平极化、垂直极化

RCS减缩几何均值 dB

频率/GHz	0°～180°		0°～80°		80°～100°		100°～180°	
	水平极化	垂直极化	水平极化	垂直极化	水平极化	垂直极化	水平极化	垂直极化
1	−0.19	1.55	0.466	1.23	−0.69	−0.31	−0.734	2.30
3	3.23	7.436	1.87	15.47	−0.53	−0.26	5.45	1.30
6	5.70	9.02	3.63	11.89	0.037	−0.18	9.10	8.33
10	6.03	9.99	7.25	17.69	1.15	0.75	6.02	4.58

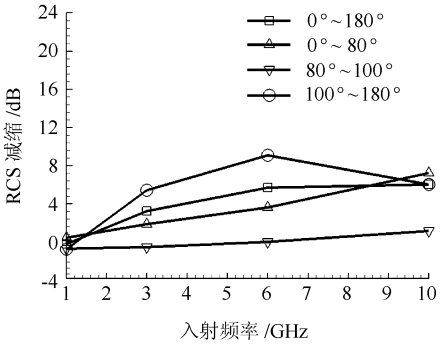


图6 水平极化下锯齿边板相对于直边板的RCS减缩结果

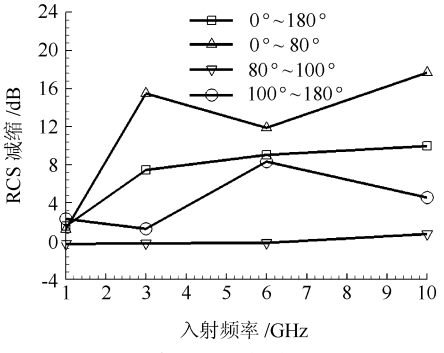


图7 垂直极化下锯齿边板相对于直边板的RCS减缩结果

4.2 锯齿边减缩特性

总结以上结论,可以看出,锯齿边板具有以下特点:

频率特性:对水平、垂直极化,锯齿边板减缩效果随着频率的增大而增加,频率为1GHz(即锯齿边板几何尺寸为1倍左右波长)时,变化不大,频率大于3GHz(即锯齿边板几何尺寸为3倍波长)时,减缩作用明显增加,分析认为是各锯齿散射场叠加为总场时由于入射角不同(各锯齿处相位信息变化)产生了不同的叠加效果.

极化特性:对于同一入射频率,垂直极化比水平极化减缩作用大.

5 结 论

本文首先对MLFMA中的多极子模式数进行了适当的改进,在保证计算精度的前提下,加快了计算速度,并减小内存使用.在此基础上,对锯齿边板的减缩作用进行了详细研究,结果表明,RCS曲线在直边板时变化趋势较为平缓,锯齿边板时则表现为各个锯齿间的耦合作用,曲线振荡明显,且垂直极化较水平极化变化大;分析了锯齿边板减缩作用的多频特性,首先在频率为1GHz时,减缩作用不明显,随着频率的增大,减缩作用明显增加,同时,垂直极化强于水平极化.此结果对于飞行器隐身设计具重要意义,可以作为采取隐身措施的参考,以获得更高的隐身性能.

参考文献(References)

[1] Song J M, Lu C C, Chew W C, et al. Fast illinois solver code (FISC) [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1998, 40(3):27−341

[2] 胡俊,聂在平,王军,等.三维电大目标散射求解的多层快速多极子方法[J].电波科学学报,2004,19(5):509−514
Hu Jun, Nie Zaiping, Wang Jun, et al. Multilevel fast multipole algorithm for solving scattering from 3-D electrically large object[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(5):509−514(in Chinese)

[3] 黄沛霖,马东立,武哲. 低RCS齿形挂架参数选择研究[J].北京航空航天大学学报, 2001,27(3):293−296
Huang Peilin, Ma Dongli, Wu Zhe. Research on parameter selection of low RCS serrated pylon[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001,27(3):293−296(in Chinese)

[4] Song J M, Chew W C. Fast multipole method solution of three dimensional integral equation[J]. IEEE Transaction on Antennas Propagation, 1995, 45(10):1528−1531

[5] Song J M, Chew W C. Error anlysis for the truncation of multipole expansion of vector Green's function[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2001, 11(7):311−313

[6] 温剑. 基于快速多极子方法的高效迭代方法及其工程应用[D].成都:电子科技大学电子工程学院,2005
Wen Jian. High efficiency iterative technic and it's application on engineering basing on FMM[D]. Chengdu: School of Electronic Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, 2005 (in Chinese)

(责任编辑:赵海容)