

MLFMA 用于不连续特征多频散射特性研究

刘战合¹, 黄沛霖¹, 高旭², 武哲¹

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191; 2. 中航第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089)

摘要:对隐身飞行器、坦克等武器系统, 缝隙等不连续特征对 RCS 的减缩和控制具有重要影响。基于混合场积分方程, 开发出了多层快速多极子算法程序, 通过将金属球双站 RCS 级数解、三缝隙实测曲线分别与多层快速多极子算法(Multilevel Fast Multipole Algorithm, MLFMA) 计算曲线进行对比, 验证了程序的正确性, 说明其可用于飞行器表面不连续特征研究。采用数值方法详细研究了单缝隙、三缝隙电磁散射与入射电磁波频率的变化关系。数值计算结果表明, 入射电磁波频率增加时, 对单缝隙, 电磁散射增强, 雷达散射截面算术均值增加, 其中掠入射角域内的均值增加最为明显; 同时单缝隙的散射曲线相似、次波峰向外偏移; 对三缝隙, 除具有单缝隙的特性外, 还表现为相互耦合性、曲线振荡增强, 通过分析认为 3 个单缝隙散射不同相位的相互叠加导致了其散射的耦合性, 入射频率增加时, 散射叠加的峰值位置发生相应变化, 表现为耦合作用和振荡作用更加明显。该结论可以用来进行飞行器表面的缝隙散射的减缩设计, 从而有效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; 多频

中图分类号: V218 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)02-0060-06

隐身技术能有效地提高武器系统的生存、突防, 尤其是纵深打击能力, 是立体化现代战争中最重要、最有效的突防技术。对于常规飞行器、坦克、舰艇等目标, 光滑金属镜面点、腔体、角体、边缘等构成了电磁散射的主体, 缝隙、台阶、铆钉、螺钉等不连续特征电磁散射源在总体散射中的比重相对较小, 如起落架舱门、维修舱门等机身表面开口与机身结合处构成的缝隙以及蒙皮缝隙等(如图 1)。而对隐身飞行器、坦克, 当上述主要散射源被有效控制减缩后, 雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)可以降低十几至几十 dB, 此时, 不连续特征散射源占总体散射的比重将大大增加, 甚至在某些极化、姿态角下影响非常明显, 因此, 对其散射机理的研究分析成为重点^[1-5]。但当前文献仅限于讨论某一频段或某一频率下的散射规律, 本文着重研究飞行器等目标表面的缝隙、台阶、多缝隙、多台阶的多频散射特性, 为飞行器、武器系统的全频段隐身设计研究及 RCS 减缩提供参考。

目前, 飞行器、舰艇的雷达散射截面计算主要应用高频方法, 其主要优点体现在计算时间和所需内存相对较少, 但高频方法不能精确模拟计算目标的表面电流, 因此不能用来求解复杂的散射目标, 如飞行器表面结构的缝隙、台阶等不连续特征。

本文开发出了基于三角形面元的多层快速多极子算法^[6-10], 经过金属球双站 RCS 计算与 Mie 级数精确解的对比、三缝隙的计算实测验证, 该方法可用于分析不连续特征的电磁散射特性。

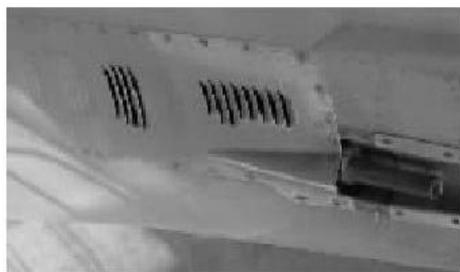


图 1 某常规战斗机表面缝隙

Fig. 1 Gaps on a conventional aircraft

* 收稿日期: 2008-11-21

基金项目: 国家“973”基础研究资助项目(61320)

作者简介: 刘战合(1977-), 男, 陕西富平人, 博士(后), 主要从事电磁散射计算及飞行器隐身设计研究;

E-mail: nwpulzh@163.com

1 数值方法

1.1 积分方程与 RWG 基函数

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,设介质常数为 ϵ 和 μ ,混和场积分方程(Combined Field Integral Equation, CFIE)^[6,8-9] 用来加快收敛并能有效地解决处于内谐振频率时的稳定性和收敛性问题。其表达式如下:

$$\alpha \hat{\mathbf{t}} \int_S dS [J(r') + \frac{1}{k^2} \nabla' J(r') \nabla] g(r, r') + 2\pi \frac{i}{k} (1 - \alpha) J(r) - \hat{\mathbf{n}} \nabla \int_S dS g(r, r') J(r') = \alpha \frac{4\pi i}{k\eta} \hat{\mathbf{t}} E^{\text{inc}}(r) + \frac{i}{k} (1 - \alpha) 4\pi \hat{\mathbf{n}} H^{\text{inc}}(r), r \in S \quad (1)$$

式中: $\hat{\mathbf{t}}$ 为散射体表面任意单位切向量; $\hat{\mathbf{n}}$ 为散射体表面单位法向矢量; 等式左边的表面电流密度 $J(r')$ 是未知量; 而等式右端为含已知入射电场的激励项 $E^{\text{inc}}(r)$ 、入射磁场激励项 $H^{\text{inc}}(r)$; 标量格林函数 $g(r, r') = e^{ik|r-r'|}/|r-r'|$; 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。

采用基于 RWG 基函数和伽辽金匹配可以将混合积分方程(1)转化为线性代数方程组,三角形面元对见图 2。

对目标散射体进行精确的几何建模后,用平面三角形网格进行模拟,图 2 中 T_n^+ 、 T_n^- 分别表示正负面元三角形(正负可以人为规定), l_n 为第 n 对三角形面元对的公共边边长, ρ_n^+ 从正面元三角形顶点出发,而 ρ_n^- 指向负面元三角形顶点,则第 n 条公共边对应的 RWG 电流基函数^[9]为:

$$J(r) = \begin{cases} l_n^+ \rho_n^+ / 2A_n^+ & r \in T_n^+ \\ l_n^- \rho_n^+ / 2A_n^- & r \in T_n^- \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中 A_n^+ 、 A_n^- 分别为正负面元三角形的面积。

1.2 多层快速多极子算法

三维散射问题的快速多极子方法(Fast Multipole Method, FMM)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。将表面积分方程转化为矩阵方程^[6,10]:

$$\sum_{i=1}^N Z_{ji} a_i = \sum_{n \in G_N} \sum_{i \in G_N} Z_{ji} a_i + \frac{ik}{4\pi} \int d^2 k \hat{\mathbf{V}}_{f_{mj}}(k) \sum_{n \in G_F} \alpha_{nn}(\hat{r}_{nn}, k) \sum_{i \in G_N} \mathbf{V}_{sni}^*(k) a_i, j \in G_m \quad (3)$$

式中: α_{mn} 是转移因子; G_N 代表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; $\mathbf{V}_{sni}(k)$, $\mathbf{V}_{f_{mj}}(k)$ 分别为聚合因子、配置因子。具体表达如下:

$$\mathbf{V}_{sni}(k) = \int_S ds' e^{ikr_{in}} [\bar{\mathbf{I}} - \hat{k} \hat{k}] \mathbf{f}_i(\mathbf{r}_{in}) \quad (4)$$

$$\mathbf{V}_{f_{mj}}(k) = \alpha \int_S dS e^{ikr_{jm}} [\bar{\mathbf{I}} - \hat{k} \hat{k}] \mathbf{t}_j(\mathbf{r}_{jm}) - (1 - \alpha) k \int_S dS e^{ikr_{jm}} \mathbf{t}_j(\mathbf{r}_{jm}) \hat{\mathbf{n}} \quad (5)$$

$$\alpha_{mn}(\hat{r}_{mn} \cdot \hat{k}) = \sum_{l=0}^L i^l (2l+1) h_l^{(1)}(kr_{mn}) P_l(\hat{r}_{mn} \cdot \hat{k}) \quad (6)$$

式中: α 为加权因子; L 为多极子模式数; $h_l^{(1)}(kr_{mn}) P_l(\hat{r}_{mn} \cdot \hat{k})$ 分别表示第 1 类 l 阶球汉克尔函数、第 l 阶勒让德多项式。

对散射体表面进行几何网格划分,经过分组得到各子散射体组,根据各组中心间距离,将两组关系分为近区组和远区组,近区组采用矩量法计算,远区组采用聚合、转移、解聚的步骤来实现矩矢相乘的求解。

多层快速多极子法是快速多极子法在多层分组结构实施,逐层分组进行聚合、转移、解聚,多层聚合是对子层各个方向上的角谱分量插值从而求得父层的聚合量,多层解聚过程与之相反,经过处理,原来的积分方程求解变为线性代数方程组的求解问题,采用共轭梯度算法来求解该方程组,收敛误差限一般为 0.01。

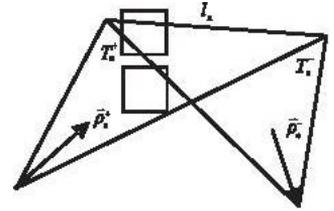


图 2 RWG 基函数面元对示意图

Fig. 2 The sketch of RWG basis function

2 数值方法的精度验证

2.1 金属球双站 RCS 计算与 Mie 级数解对比

采用混合场积分方程,利用多层快速多极子方法,计算半径为 1 m 的金属球,入射电磁波频率 $f=2$ GHz,图 3 是导体金属球双站 E 平面 RCS 计算结果。采用 MLFMA 方法,使用内存 587 MB,未知数目 $N=101\ 823$ 个,最细层立方体边长 $D_{cube}=\lambda/2$,混合积分场组合系数 $\alpha=0.5$ 。图 3 中,MLFMA 方法计算结果与精确 Mie 级数解吻合很好,说明本程序实现了电大散射体的 RCS 求解,可以用于目标的 RCS 分析计算。

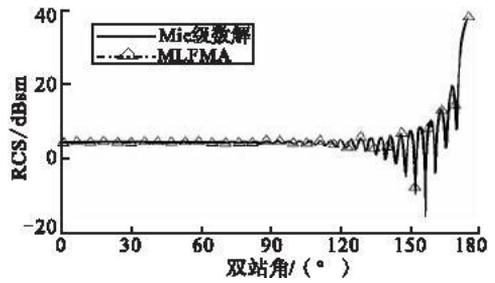


图 3 金属球双站 RCS 计算对比

Fig.3 The bistatic RCS of a metal sphere

2.2 三缝隙单站 RCS 计算与实测对比

飞行器等目标中不连续特征以多缝隙居多,具有复杂的电磁散射特性,有必要详细研究,而如前所述高频近似方法无法精确计算,文中采用多层快速多极子方法。为验证数值方法,计算了三缝隙板的单站 RCS,三缝隙板结构如图 4,边长 400 mm,板厚 5 mm,三缝隙并排置于平行于板对角线方向,缝隙宽度为 2 mm,缝隙间距 $d=30$ mm,缝隙长 400 mm,计算和实验沿俯仰角变化。为分析方便,设试验件对角线长度为 L ,定义: $R=L/\lambda$ 。

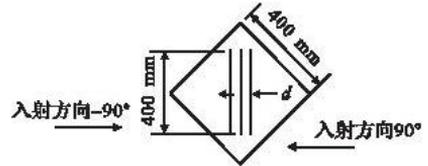


图 4 三缝隙板示意图

Fig.4 The sketch of three - gaps plate

图 5 为三缝隙板在入射频率 $f=10$ GHz 沿俯仰角变化时的单站 RCS 曲线,分别是本文暗室测试结果、MLFMA 方法的计算结果。几何网格划分时三角形面元边长控制为 $1/7$ 倍波长,使用内存 368 MB,未知数目 $N=46\ 035$ 个,其他参数设定同 2.1 节算例。图 5 中,计算结果与实验结果吻合较好,说明本程序能够用于复杂散射体的 RCS 求解分析。图中实测曲线的不对称与吻合较差的原因是三缝隙设置的不完全对称和缝隙制作时非严格垂直于板表面。

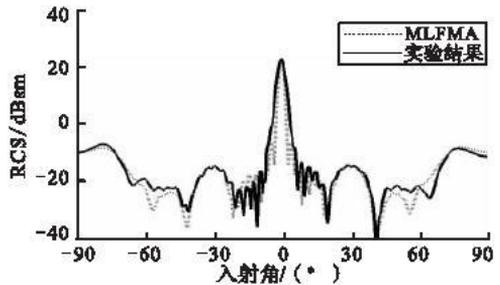


图 5 三缝隙板水平极化 RCS 计算实测对比

Fig.5 The computational and experimental results of three - gaps plate for HH polarization

3 缝隙多频散射特性数值分析

若采取在飞行器或坦克表面开缝隙的办法来研究其影响,单个(或稍多)的不连续特征相对整体而言较弱,建模和计算均不易进行,因此该方法并不实用甚至不可能实施。为进行机理性研究,将缝隙台阶等置于金属平板的对角线上,以适当排除金属平板自身和边缘电磁散射的影响,与其对应入射频率下的金属平板进行对比,分析不连续特征的多频散射特性。由于对飞行器、兵器,其表面不连续特征大多情况下以单列或平行排列的多列分布,因此,分别设计了单缝隙、三缝隙来研究其多频散射机理,从而为隐身设计提供参考。

3.1 单缝隙散射特性计算分析

单缝隙计算模型和三缝隙计算模型相似,其边长为 200 mm,单缝隙长 200 mm,厚度为 5 mm,宽度为 5 mm,布置方式同三缝隙板,位于对角线方向。入射频率分别为: 6 GHz(XC 波段)、10 GHz(X 波段)、12 GHz(X 波段)、15 GHz(Ku 波段),对应 R 分别为 5.6、9.5、11.2、14.2,主要研究单缝隙板 RCS 的多频散射特性。

图 6 是不同频率下入射电磁波随俯仰角变化的 RCS 曲线图。表 1 表示在 $-90^\circ - -60^\circ$ 、 $-60^\circ - -10^\circ$ 、 $-10^\circ - 0^\circ$ 、 $-90^\circ - 0^\circ$ 角域内不同频率下单缝隙板 RCS 算术均值。

从图 6 中可以看出,随频率的增加,单缝隙板的散射发生变化,表现为如下 3 个特点:

1) 从散射曲线来看,频率从 6 GHz 增加到 15 GHz 时,曲线的空间分布一致,可分为 3 部分:掠入射时行波散射作用引起的次波峰区,大角域的平坦区, $\pm 10^\circ$ 之内的镜面散射区。

2) 行波散射引起的次波峰随频率增加向外偏移,且曲线逐渐变平。入射频率为 6 GHz 时,次波峰出现在 $\pm 55^\circ$ 左右,且波峰最宽;入射频率为 10 GHz、12 GHz、15 GHz 时,波峰分别出现在 $\pm 67^\circ$ 、 $\pm 70^\circ$ 、 $\pm 74^\circ$ 左右,且逐渐变窄,峰值与整个曲线一致随频率的增加而递增。

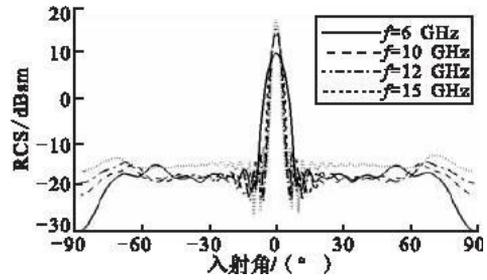


图 6 不同频率单缝隙 RCS 计算曲线
Fig.6 The RCS curves of different frequencies for single-gap plate

表 1 不同入射频率变化时各角域内的算术均值

Tab. 1	The RCS average value of different angle zones for different frequencies				dBsm
	$-90^\circ - -60^\circ$	$-60^\circ - -10^\circ$	$-10^\circ - 0^\circ$	$-90^\circ - 0^\circ$	
$f=6$ GHz	-23.164 7	-21.409 3	3.911 7	-21.580 0	
$f=10$ GHz	-20.896 3	-21.619 2	6.247 9	-21.342 6	
$f=12$ GHz	-19.883 0	-21.610 4	6.917 4	-20.866 7	
$f=15$ GHz	-18.384 8	-18.709 3	7.999 7	-18.746 4	

RCS 曲线随频率的增加,在不同角域内均有所增加。由图 6 看出,入射频率为 10 GHz 和 12 GHz 的散射曲线由于频率比较接近(在同一波段即 X 波段内)除行波散射作用区之外其余角域变化较小。表 1 为不同入射频率下不同角域内的 RCS 算术均值,可以看出,掠入射时, $-90^\circ - -60^\circ$ 角域(入射频率 6 GHz 时为 $-90^\circ - -50^\circ$) 内的 RCS 算术均值随入射频率的增加依次增加。在 $-60^\circ - -10^\circ$ 角域(入射频率 6GHz 时为 $-50^\circ - -10^\circ$) 内,频率分别为 6 GHz、10 GHz、12 GHz 时 RCS 算术均值变化不大,为 -21 dBsm 左右,而 15 GHz 时为 -18.709 3 dBsm,增大了 3 dB 左右,表现为大角域内的平坦递增。对镜面散射作用区,即 $\pm 10^\circ$ 角域内,随频率的增加,峰值变大,同时波峰变窄,算术均值依次随频率增加而增加,说明频率增大导致该角域内散射增强比较明显。对 $-90^\circ - 0^\circ$ 角域内,算术均值增大,但速度较慢。可见,以掠入射时的行波散射作用区均值增加最为迅速。

3.2 三缝隙数值计算分析

三缝隙板见图 4,间距为 $d = 20$ mm,缝隙宽 3 mm,入射频率分别为: 6 GHz(XC 波段)、8 GHz(XC 波段)、10 GHz(X 波段)、12 GHz(X 波段),对应 R 分别为 11.2、14.9、19、22.4,研究三缝隙板 RCS 的多频散射特性。

图 7 表示三缝隙 RCS 计算曲线,可以看出,缝隙对散射的影响相对较大,在 -20 dBsm 左右振荡。对于 $f=6$ GHz,散射曲线在 $\pm 70^\circ$ 有个较弱的次波峰,趋势表现为大范围的平坦; $f=8$ GHz 时,掠入射的行波散射作用增大,表现为两侧较大的波峰;而 $f=10$ GHz 和 $f=12$ GHz 次波峰依次增多,散射影响表现为随着频率的增加,振荡更加剧烈,且振幅迅速增加,10 GHz 以上时振幅基本不变。 $-90^\circ - 0^\circ$ 角域内的算术均值随频率的变化依次为 -20.715 6 dBsm、-15.014 0 dBsm、-15.916 8 dBsm、-14.655 3 dBsm,与单缝隙相比,同频率下三缝隙的算术均值较大,说明散射增强。入射频率的增加对多缝隙电磁散射的空间分布、波峰位置影响较大,分析是各缝隙电磁散射相对独立,在叠加为总场时由于入频率(波长)不同(各单缝隙处相位信息变化)产生不同的叠加效果(有增有减)。

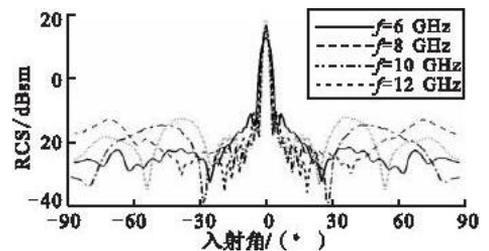


图 7 不同频率三缝隙 RCS 计算曲线
Fig.7 The RCS curves of different frequencies for three-gaps plate

3.3 缝隙散射特性小结

3.3.1 单缝隙散射特性

- 1) 相似性。对同一单缝隙板,频率变化时散射趋势表现一致。
- 2) 行波散射波峰偏移。频率增大时,行波散射引起的次波峰随频率增加向外偏移,且曲线逐渐变平。

3) 频率增大时, 散射增强, 其中掠入射时的均值增加最为明显。

3.3.2 多缝隙散射特性

1) 相互耦合性。单缝隙板的散射表现为平缓的曲线, 而多缝隙之间的耦合表现为剧烈的振荡。

2) 随频率的增加, 多缝隙的耦合更加明显, 表现为曲线振荡更加剧烈。

需要指出的是, 对于单缝隙和多缝隙, 垂直极化的散射特征和水平极化的散射特征具有相似性。

3.3.3 频率特性

由前文所述, 可以看出, 缝隙散射的频率特性体现在两个方面, 一是单缝隙散射曲线表现出的行波峰值的变化以及多缝隙散射的耦合特性; 二是散射各个角域内的 RCS 均值的频率特性, 考虑到频率对缝隙的散射影响体现在除镜面散射外较大角域内, 将单缝隙和三缝隙的 $0^\circ - 90^\circ$ 角域内的 RCS 均值随入射频率的变化趋势表示为图 8。

图 8 表明, 在 0° 到 90° 角域内, 对单缝隙、三缝隙, 其 RCS 均值整体表现为增加的趋势, 说明电磁散射增强, 结合图 6 和图 7, 可以看出, 散射曲线表现出明显不同的特性, 即对单缝隙为次波峰的变化, 而三缝隙为振荡的增加。

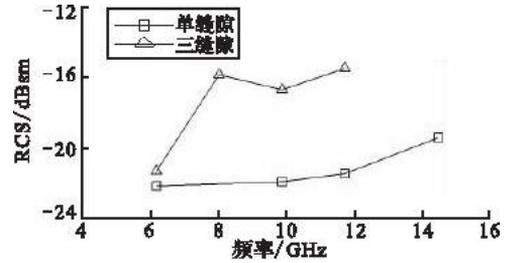


图 8 频率变化时缝隙 RCS 均值变化曲线

Fig. 8 The RCS average curves of gap with different frequencies

4 多缝隙耦合散射的理论分析

根据文献[1], 当电磁波入射角满足下式时, 该入射角对应 RCS 散射曲线中的峰值。

$$\sin\theta = (N\lambda)/(2d) \quad (7)$$

式中: θ 为电磁波入射方向; λ 为入射波长; d 为缝隙间距; N 为自然数。该关系式是建立在本文设计的均匀间距的基础上, 对于间距不等的情况, 可由波程差来推导类似的关系式。

文中缝隙间距 $d = 20 \text{ mm}$, 当入射频率为 12 GHz 时, 波长为 25 mm , 则散射波峰对应的 $\sin\theta$ 应该为 $0, \pm 0.625$, 入射角对应为 $0^\circ, \pm 38.6^\circ$, 同理, 当入射波频率为 10 GHz 时, 对应 $\sin\theta$ 应该为 $0, \pm 0.75$, 入射角对应为 $0^\circ, \pm 48.6^\circ$ 。可以预见, 当频率上升时, 由于波长减小, 引起 $\sin\theta$ 所取的值会更多, 因此对应的峰值数目增加, 表现为频率增加时, 三缝隙的耦合散射增强, 从而振荡增强, 这与计算结果一致。

将以上分析结果与图 7 对比, 发现对应的入射角上均存在一个峰值, 从另一方面验证了本文算法的正确性。

5 结束语

飞行器表面的不连续特征主要表现为缝隙、台阶、铆钉等, 本文采用多层快速多极子算法对谐振区 ($R < 20$) 和 高频区 ($R > 20$) 的单缝隙、单台阶、三缝隙电磁散射特性进行了计算分析, 研究了计算模型的多频散射特性。频率增大时, 单缝隙散射增强, 次波峰向外偏移; 多缝隙散射耦合增强, 曲线振荡更加剧烈。这一研究结果对飞行器、坦克、导弹的隐身设计具有参考意义。

参考文献:

- [1] 黄沛霖, 刘战合. 飞行器表面缝隙电磁散射特性研究[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 675-680.
HUANG Peilin, LIU Zhanhe. Research on Electromagnetic Scattering Characteristics of Slits on Aircraft [J]. Acta Aeronautica & Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 675-680. (in Chinese)
- [2] 张振利, 倪维立. 缝隙及其与边缘的相互作用对目标散射的影响[J]. 电波科学学报, 2001, 16(3): 301-305.
ZHANG Zhenli, NI Weili. The Scattering by Gaps and the Multiple Scattering between Gaps and Edges [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(3): 301-305. (in Chinese)
- [3] Senior T, Volakis J. Scattering by Gaps and Cracks [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(6): 744-750.
- [4] Senior T, Natzke J. Scattering by A Narrow Gap [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(3): 362-

372.

- [5] 朱劲松, 于洋, 王宝发. 飞行器结构缝隙电磁散射问题的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(1): 99 - 102.
ZHU Jinsong, YU Yang, WANG Baofa. Research on Electromagnetic Scattering for Aircraft Structural Slot [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 25(1): 99 - 102. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] 刘战合, 黄沛霖, 武哲, 等. 基于 MLFMA 的飞行器锯齿边板散射特性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(5): 499 - 503.
LIU Zhanhe, HUANG Peilin, WU Zhe, et al. Analysis of Scattering from Serrated Edge Plate on Aircraft with MLFMA [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 499 - 503. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] Rao S M, Wilton D R, Glisson A W. Electromagnetic Scattering by Surfaces of Arbitrary Shape [J]. IEEE Transaction on Antennas Propagation, 1982, 30(5): 409 - 418.
- [10] 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.

(编辑:徐楠楠)

Multi - waves Scattering Characteristic of Gaps in Aircraft Surface with MLFMA

LIU Zhan - he¹, HUANG Pei - lin¹, GAO Xu², WU Zhe¹

(1. School of Aeronautics Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. The First Aircraft Institute of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: For stealth aircrafts and tanks, the discontinuous characters such as gaps are important for RCS (Radar Cross Section) reduction and control. Basing on CFIE (Combined Field Integral Equation), a program using MLFMA (Multilevel Fast Multi - pole Algorithm) is developed. The bistatic RCS of metal sphere by Mie series solution and the experimental curves of a multi - gap plate are compared with computational curves to validate the correctness of this program which shows that the program can be used in investigating the scattering from discontinuous characters in aircraft surface. The relation of single - gap, three - gap and incoming frequency is researched by MLFMA. When the incoming frequency is greater, numerical results show that the electromagnetic scattering enhances and the RCS arithmetic average increases for single - gap and multi - gap; when the incoming angle is small, the average value increases fast, for single - gap plate, the curves are similar for different frequencies and the second crest of curve moves far away from the major crest, scattering from multi - gap has coupling performance and the curves change sharply beside the characteristic of single - gap plate. The coupling performance is gained by the superposition of different phases of three single - gaps, when frequency increases, the position of scattering superposition changes, at the same time, the effects of couple and surge will be obvious. This conclusion can find its application in the design of reducing the RCS of scattering from the gaps in aircraft surface and thus improve the stealth performance of aircraft.

Keywords: multilevel fast multi - pole algorithm; electromagnetic; scattering; radar cross section; multi - waves