

用 ADI-FDTD 分析某弹头雷达散射截面

安翔 吕志清

摘 要 采用无时间约束的时域有限差分法 ADI-FDTD 计算了某弹头的双站雷达散射截面(RCS)。与传统的 FDTD 不同, ADI-FDTD 采用交替隐式差分方向的技术, 使时间步长不再受 CFL 条件约束, 可以大幅度降低计算时间, 提高计算效率。

关键词 ADI-FDTD 电磁散射 雷达散射截面

引言

飞机、导弹等复杂目标的电磁散射特性分析不仅是当前计算电磁学领域的重要发展方向之一, 而且具有很强的工程应用价值。尽管可能通过大量的试验和测量来研究飞机、导弹等目标的电磁散射特性, 但这样做费力费时, 成本昂贵, 相比而言, 采用数值仿真方法就显得更加高效廉价。

FDTD(Finite Difference Time Domain 时域有限差分)方法是一种非常有效的数值计算方法, 被广泛应用于天线、电磁兼容、生物电磁场以及散射等问题。然而, 传统的 FDTD 属于显式差分方法, 其时间步长必须满足 Courant-Friedrich-Levy(CFL)条件^[1], 在分析诸如飞机、导弹等大目标的散射问题时, 往往需要很大的存储量和很长的计算时间。1999 年以来, 人们开始将交替隐式差分方向法(Alternating-Direction Implicit Method, ADI)引入 FDTD^[2~4], 这种方法把传统 FDTD 的一个时间步分成两个子步, 交替使用显式和隐式差分, 从而不再受 CFL 条件制约, 在时间上是无条件稳定的, 因此能够大幅度减少计算时间, 为采用 FDTD 计算复杂目标的散射特性开辟了一条新的途径。

1 计算模型

某型弹头的母线尺寸和三维实体模型图分别如图 1、图 2 所示^[5]。

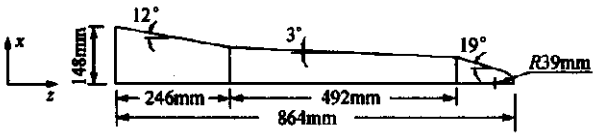


图 1 某弹头母线尺寸图

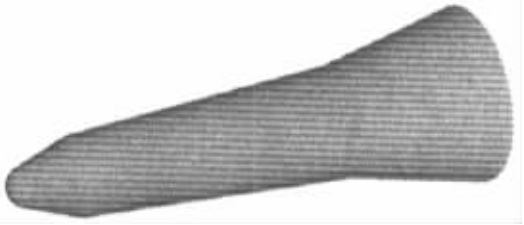


图 2 某弹头的三维实体模型图

2 圆柱坐标系中的 ADI-FDTD

由于弹头是一个旋转对称体, 所以本文选择圆柱坐标系, 将 Maxwell 方程在圆柱坐标系中展开成分量形式^[6], 例如:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (r H_{\phi})}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \phi} = \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \quad (1)$$

对公式(1)做差分离散时, ADI-FDTD 将第 $n \rightarrow n+1$ 时间步分成两个子步: $n \rightarrow n+1/2$ 子步和 $n+1/2 \rightarrow n+1$ 子步, 在这两个子步中, 对左端项的两个磁场分量交替使用隐式和显式差分。

1) $n \rightarrow n+1/2$ 子步, 对 H_{ϕ} 取隐式, 对 H_r 取显式, 得到

$$\frac{E_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k + \frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k + \frac{1}{2})}{\Delta t/2} = \frac{1}{\varepsilon \cdot i \cdot \Delta r} \cdot \left[\frac{((i + \frac{1}{2}) \cdot \Delta r \cdot H_\varphi^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) - (i - \frac{1}{2}) \cdot \Delta r \cdot H_\varphi^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}))}{\Delta r} - \frac{H_r^n(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - H_r^n(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})}{\Delta \varphi} \right] \quad (2)$$

2) $n + 1/2 \rightarrow n + 1$ 子步, 对 H_r 取隐式, 对 H_φ 取显式, 得到

$$\frac{E_z^{n+1}(i, j, k + \frac{1}{2}) - E_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k + \frac{1}{2})}{\Delta t/2} = \frac{1}{\varepsilon \cdot i \cdot \Delta r} \cdot \left[\frac{((i + \frac{1}{2}) \cdot \Delta r \cdot H_\varphi^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) - (i - \frac{1}{2}) \cdot \Delta r \cdot H_\varphi^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}))}{\Delta r} - \frac{H_r^{n+1}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - H_r^{n+1}(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})}{\Delta \varphi} \right] \quad (3)$$

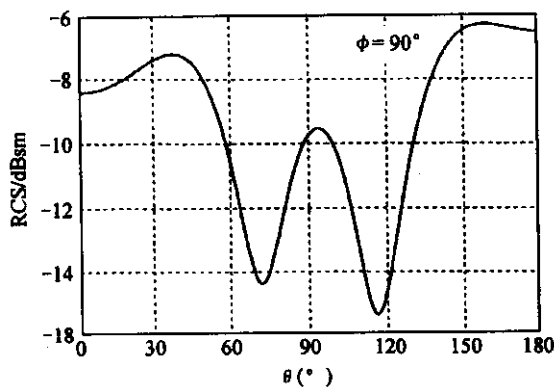


图3 雷达散射截面(入射波频率为500MHz)

其它5个电磁场分量的公式可以用相同的方法得到。显然,公式(2)和(3)的右端项和左端项都包含未知场量,因此,在每一个时间子步,必须联立求解。在 $n \rightarrow n + 1/2$ 子步,将 H_φ 的差分公式代入(2),得到关于 $E_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k + \frac{1}{2})$ 、 $E_z^{n+\frac{1}{2}}(i - 1, j, k + \frac{1}{2})$ 、 $E_z^{n+\frac{1}{2}}(i + 1, j, k + \frac{1}{2})$ 的三元方程。按照完全相同的步骤,可以得到其它场分量的方程。对于整个计算区域,可以写成一个矩阵方程

$$M_1 X^{n+\frac{1}{2}} = P_1 X^n \quad (4)$$

类似的,在 $n + 1/2 \rightarrow n + 1$ 子步,也可以得到一个矩阵方程

$$M_2 X^{n+1} = P_2 X^{n+\frac{1}{2}} \quad (5)$$

以上两式中, X 是包含了所有场分量的向量,上标表示计算时刻; M_1 、 M_2 、 P_1 、 P_2 都是系数矩阵,而且 M_1 和 M_2 的每一行最多只有三个非零元素,因此方程(4)、(5)很容易求解,这样就完成了从 $n \rightarrow n + 1$ 时间步的推进。

3 数值计算结果

3.1 算例1

为了验证上述算法,作者首先计算了当入射平面波的频率为500MHz、传播的方向沿负 z 轴、电场极化方向平行 x 轴时,图2所示弹头的双站雷达散射截面,计算结果见图3。对比图3和文献[5]的计算结果(没有涂覆的情况),可以看出两者吻合得很好,这说明本文所采用的ADI-FDTD是准确的。

3.2 算例2

作者在DELL6400服务器上(配置有4颗Intel Xeon 2.0GHz CPU, 8GB内存)分别采用传统的FDTD和ADI-FDTD计算了图2所示弹头的双站雷达散射截面,取入射平面波的频率为3.0GHz,波长为100mm。当采用传统的FDTD时,取 $\Delta t =$

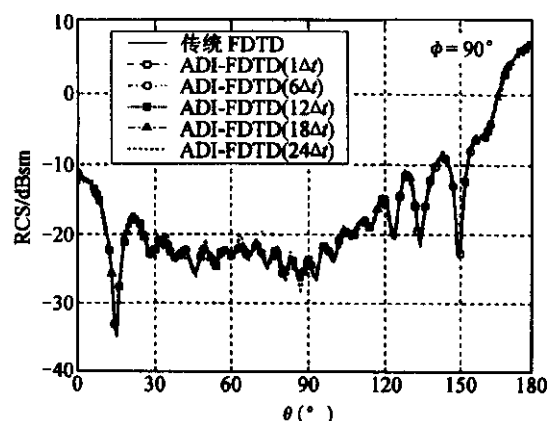


图4 雷达散射截面(入射波沿 z 轴入射)

Δt_{CFL} (Δt_{CFL} 是满足 CFL 条件的最大时间步长); 当采用 ADI-FDTD 时, 取 Δt 分别为 Δt_{CFL} 、 $6\Delta t_{\text{CFL}}$ 、 $12\Delta t_{\text{CFL}}$ 、 $18\Delta t_{\text{CFL}}$ 、 $24\Delta t_{\text{CFL}}$ 。图4是入射波沿 z 轴入射, 电场极化方向平行于 x 轴时的计算结果; 图5是入射波沿 x 轴入射, 电场极化方向平行于 z 轴时的计算结果; 表1列出了这两种方法所占用的计算时间。从中可以看出, ADI-FDTD 所占用的计算时间

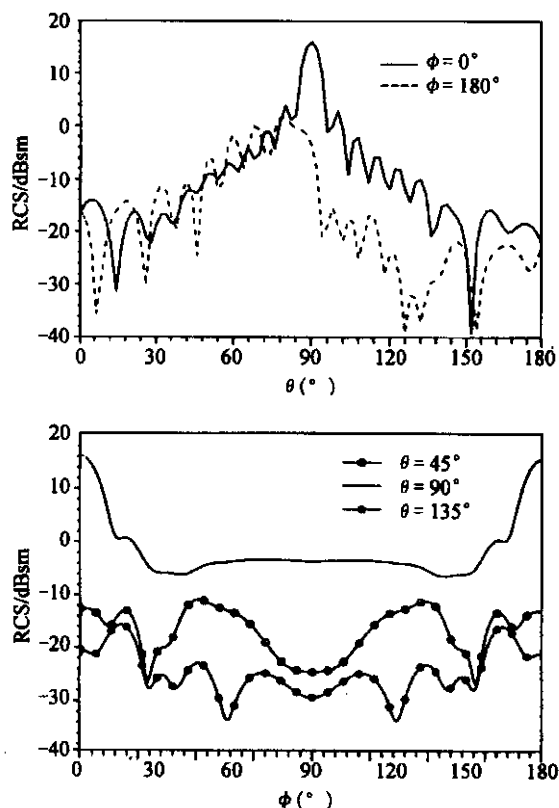


图5 雷达散射截面(入射波沿 x 轴入射)

远小于传统的 FDTD。

表1 传统 FDTD 与 ADI-FDTD 所占用计算时间的比较

| 时间步长 方法 | $\Delta t_{\text{CFL}}/\text{s}$ | $6\Delta t_{\text{CFL}}/\text{s}$ | $12\Delta t_{\text{CFL}}/\text{s}$ | $18\Delta t_{\text{CFL}}/\text{s}$ | $24\Delta t_{\text{CFL}}/\text{s}$ |
|------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 传统 FDTD | 426920.2 | 发散 | 发散 | 发散 | 发散 |
| ADI-FDTD | 43587.9 | 175642.4 | 75039.7 | 57760.6 | 48072.3 |

需要指出的是: 尽管 ADI-FDTD 不再受 CFL 条件约束, 对时间步长是无条件稳定的, 然而它仍然受数值色散条件的制约, 如果时间步长取得太大, 就会导致计算结果变差, 对于本文的算例, 计算表明时间步长不宜大于 $40\Delta t_{\text{CFL}}$ 。

4 结论

复杂目标的散射特性分析是当前计算电磁学领域的重要发展方向之一, 具有很强的工程应用意义。应用 FDTD 计算三维电大目标的雷达散射截面时, 最突出的问题是: 需要很大的存储量和很长的计算时间。本文所采用的 ADI-FDTD 将一个时间步分成两个子步, 交替使用显式和隐式差分, 使时间步长不再受 CFL 条件约束, 从而可以大幅度降低计算时间, 提高计算效率。

参考文献

- 1 A. Taflov. Computational Electromagnetics: The Finite Difference Time Domain Method. Artech House, Boston, 2000
- 2 T. Namiki. A new FDTD algorithm based on alternating-direction implicit method, IEEE Trans. MTT. 1999 47(10): 2003 ~ 2007
- 3 F. H. Zheng Z. Z. Chen and J. Z. Zhang. Toward the development of a Three Dimensional unconditionally stable finite difference time domain method, IEEE Trans. MTT. 2000 48(9): 1550 ~ 1558
- 4 C. H. Yuan Z. Z. Chen. A three dimensional unconditionally stable ADI-FDTD method in the cylindrical coordinate system. IEEE Trans. MTT. 2002 50(10): 2401 ~ 2405
- 5 李明之, 王长清, 祝西里. 用 FDTD 方法分析涂覆目标的散射. 北京大学学报(自然科学版) 2001 37(1): 71 ~ 73
- 6 R. F. Harrington. Time-Harmonic Electromagnetic Fields. McGraw-Hill, 1961

雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

易迪拓培训(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/>