

基于 UPML - FDTD 的隐身目标超宽带双站 RCS 计算

孙宏伟, 张永顺

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:为了减小 PML 吸收边界条件的内存量,提出采用 UPML 吸收边界计算隐身目标的超宽带双站 RCS。首先对 UPML 吸收边界进行了详细的理论推导,建立了隐形飞机 F117A 的几何模型,然后采用 UPML - FDTD 方法计算了 F117A 在不同双站角时的超宽带 RCS。计算结果与文献中的测量结果进行比较,两者吻合较好,证明了该方法的有效性。

关键词:非分裂式理想匹配层;时域有限差分;超宽带;双站 RCS

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:**A **文章编号:**1009 - 3516(2007)03 - 0029 - 04

时域有限差分(FDTD)方法是近年来发展最迅速、最受关注和应用范围最广的数值方法之一。1994年法国人 Berenger 提出了完全匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)吸收边界条件的概念,并成功地应用于二维及三维电磁问题的求解^[1-2]。Berenger 提出的 PML 是场量分裂式方程,这不但使编程工作变得复杂,而且加大了内存的使用量。Gedney 提出了改进的 PML 吸收边界条件,不需要进行场量的人为分离,更符合物理实际,并且和传统的 PML 相比具有类似甚至更优的效果。这种吸收边界称为非分裂式理想匹配层(UPML)吸收边界^[3]。本文基于 UPML 吸收边界计算隐身目标的超宽带双站 RCS。

1 理论分析

在 UPML 层中,Maxwell 旋度方程如下:

$$\begin{cases} \nabla \times \check{\mathbf{H}} = j\omega\epsilon \check{\mathbf{E}} \\ \nabla \times \check{\mathbf{E}} = -j\omega\mu \check{\mathbf{H}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\check{\mathbf{s}}$ 为对角张量,其表达式为

$$\check{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} s_x^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & s_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_y & 0 & 0 \\ 0 & s_x^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & s_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_z & 0 & 0 \\ 0 & s_x & 0 \\ 0 & 0 & s_y^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_y s_z s_x^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & s_x s_z s_y^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & s_x s_y s_z^{-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $s_m = K_m + \frac{\sigma_m}{j\omega\epsilon_0}$, $m \in (x, y, z)$, σ_m 为 UPML 层中人为设置的电导率函数, K_m 是为了有效吸收所设置的衰减函数,两者均为坐标的函数。由式(1)、(2)得

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \check{H}_z}{\partial y} - \frac{\partial \check{H}_y}{\partial z} \\ \frac{\partial \check{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \check{H}_z}{\partial x} \\ \frac{\partial \check{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \check{H}_x}{\partial y} \end{bmatrix} = j\omega\epsilon \begin{bmatrix} \frac{s_y s_z}{s_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{s_x s_z}{s_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{s_x s_y}{s_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \check{E}_x \\ \check{E}_y \\ \check{E}_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

收稿日期:2006-09-27

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2004F21)

作者简介:孙宏伟(1978-),男,山东昌邑人,博士生,主要从事超宽带雷达目标特性和目标识别研究;
张永顺(1961-),男,陕西咸阳人,教授,博士生导师,主要从事雷达和电子对抗研究。

如果直接把 s_m 代入式(3)并转换到时域将出现张量系数和电场 E 之间的卷积运算,该方法运算量太大。为此,引入辅助方程

$$\check{D}_x = \varepsilon \frac{s_x}{s_x} \check{E}_x \quad ; \quad \check{D}_y = \varepsilon \frac{s_x}{s_y} \check{E}_y \quad ; \quad \check{D}_z = \varepsilon \frac{s_y}{s_z} \check{E}_z \quad (4)$$

将上式代入式(3),可得

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \check{H}_z}{\partial y} - \frac{\partial \check{H}_y}{\partial z} \\ \frac{\partial \check{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \check{H}_z}{\partial x} \\ \frac{\partial \check{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \check{H}_x}{\partial y} \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} s_y & 0 & 0 \\ 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & s_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \check{D}_x \\ \check{D}_y \\ \check{D}_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

将 $s_m = K_m + \frac{\sigma_m}{j\omega\varepsilon_0}$ 代入式(5)并进行傅里叶反变换,可得时域微分方程^[4]

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} K_y & 0 & 0 \\ 0 & K_z & 0 \\ 0 & 0 & K_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} + \frac{1}{\varepsilon} \begin{bmatrix} \sigma_y & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_z & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

对式(6)进行 Yee 网格离散,可以得到直角坐标系下 UPML 层中的 FDTD 迭代公式,以电场的 E_x 分量为例:

$$D_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1} = \left(\frac{2\varepsilon K_y - \sigma_y \Delta t}{2\varepsilon K_y + \sigma_y \Delta t} \right) D_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1} + \left(\frac{2\varepsilon \Delta t}{2\varepsilon K_y + \sigma_y \Delta t} \right) \cdot \left(\frac{H_x \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_x \Big|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} - \frac{H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \right) \quad (7)$$

$$E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} = \left(\frac{2\varepsilon K_z - \sigma_z \Delta t}{2\varepsilon K_z + \sigma_z \Delta t} \right) E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} + \left[\frac{1}{(2\varepsilon K_z - \sigma_z \Delta t) \varepsilon} \right] \cdot \left[(2\varepsilon K_x + \sigma_x \Delta t) D_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - (2\varepsilon K_x - \sigma_x \Delta t) D_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \right] \quad (8)$$

其中, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为 3 个坐标方向上的网格步长, Δt 为离散时间步长。这样,通过辅助方程得到了 UPML 层中的 FDTD 迭代方程。PML 吸收边界计算时需要将 6 个电磁场分量分解为 12 个电磁场分量^[5],而 UPML 不需要进行场量的分解。

2 数值算例

2.1 隐形战斗机 F117A 的几何模型

对于具有复杂几何外形的目标,首先将其按几何外形的特点分解为几个部件,然后对各个部件分别建立其几何外形及尺寸的描述文件,并进行 FDTD 剖分。最后将剖分后各个部件拼接,形成整体的离散模型。建模过程可分为以下 4 步:①部件拆分;②建立目标的几何参数描述文件,建立各个部件的外形型值点文件;③ FDTD 剖分;④模型显示,检验建模是否正确^[6]。

对于离散后各个部件的拼接,根据各个部件在整体坐标系中的相对位置,就可拼接到正确的位置上。为避免各个部件拼接后可能出现的空隙,在型值点录入时,可将相邻部件的型值点相互嵌入对方,这样模型会

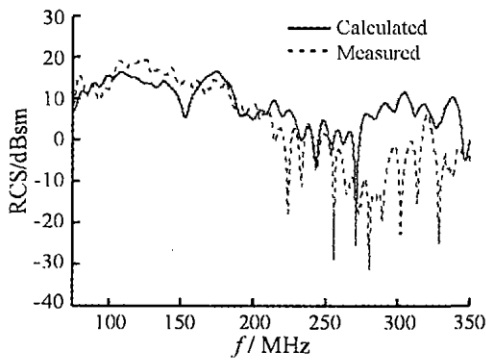
出现重叠。但当目标为同一种介质时,这种重叠可以不予考虑。图 1 给出了隐形战斗机 F117A 的几何模型。



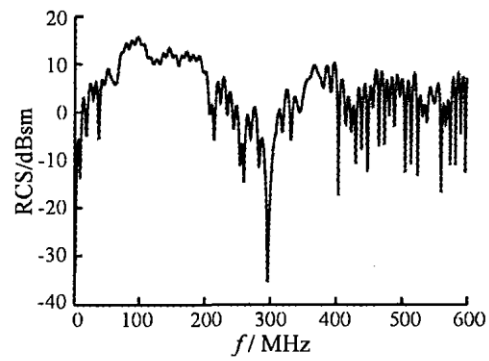
图 1 隐形战斗机 F117A 的实体模型和网格模型

2.2 超宽带双站 RCS 计算

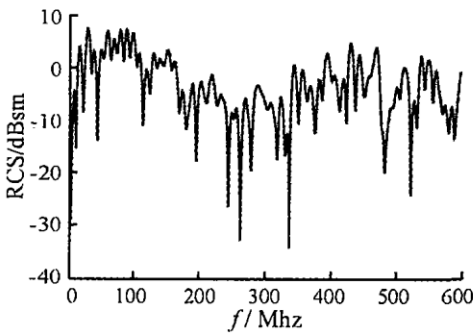
计算时采用的隐形飞机 F117A 的尺寸为:机长 20.08 m,翼展 13.20 m,机高 2.32 m。剖分时的网格大小为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 50 \text{ mm}$,时间步长为 $\Delta t = \frac{\Delta x}{2c} = 83.3 \text{ ps}$, c 为光速。入射平面波为 TE 波, VV 极化,每次计算运行 2 000 个时间步长。当双站角分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ 时,计算结果如图 2 所示。其中双站角为 0° 时的计算结果与文献[7]中的结果进行了对比,两者吻合较好,证明了该方法的有效性。由图 2 可知,当双站角为 135° 和 180° 时(即雷达从飞机后侧向和尾部接收),隐身目标 F117A 的 RCS 基本在 10 dBsm 以上,已完全失去隐身效果。



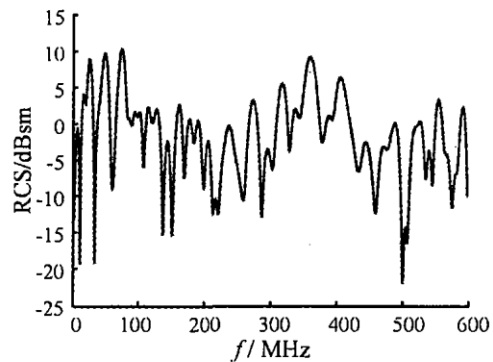
(a) 双站角 0° 时的 RCS 文献[7]结果



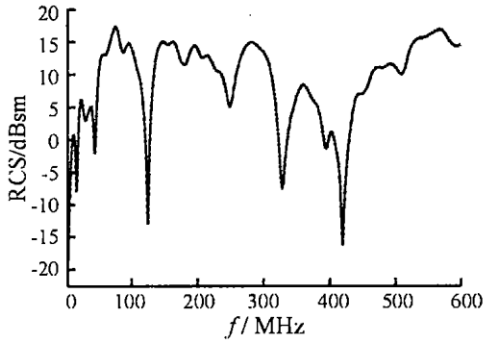
(b) 双站角 0° 时的 RCS 本文方法



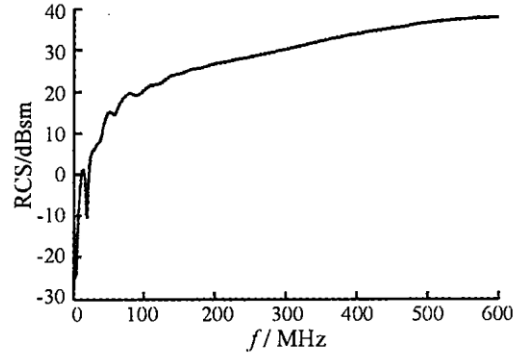
(c) 双站角为 45° 时的 RCS



(d) 双站角为 90° 时的 RCS



(e) 双站角为 135°时的 RCS



(f) 双站角为 180°时的 RCS

图2 飞机头部入射时超宽带双站 RCS

3 结论

基于 UPML - FDTD 方法计算了隐形飞机的超宽带双站散射特性,得到了不同双站角下目标的超宽带 RCS。UPML 和 PML 相比不需要进行场量分解,占用更少的计算机内存。隐身目标的超宽带双站散射特性可用于雷达目标识别和反隐身技术研究。

参考文献:

- [1] 高本庆. 时域有限差分法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [2] Karl S Kunz, Raymond J. Luebbers. The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics[M]. Boca Raton, FL: CRC PRESS, 1993.
- [3] Gedney S D. An anisotropic PML Absorbing Media For the FDTD Simulation For Fields in Lossy and Dispersive Media[J]. Electromagnetics, July - Aug. 1996, 16(4): 399 - 415.
- [4] Allen Taflove, Susan C. Hagness. Computation Electrodynamics: The Finite - Difference Time - Domain Method[M]. Boston: Artech House, inc, 2000.
- [5] 朱章虎, 卢万铮, 冯奎胜. FDTD 计算中 PML 的简化应用及编程实现[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2006, 4(2): 57 - 59.
- [6] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [7] 莫锦军. 隐身目标低频超宽带电磁散射特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.

(编辑: 田新华)

Computation on Ultra - Wideband Bistatic RCS of Target Based on UPML FDTD

SUN Hong - wei, ZHANG Yong - shun

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

Abstract: The ultra - wideband (UWB) scattering characteristics of targets are computed by using the method of FDTD with Unsplit - field Perfectly Matched Layer (UPML) boundary condition. UPML absorbing boundary condition needs less storage by introducing auxiliary equations. The ultra - wideband bistatic RCS of F117A fighter is computed in this paper. The computation results are compared with the results in Ref. 1 and both accord with each other well.

Key words: Unsplit - field Perfectly Matched Layer (UMPL); finite difference in time domain (FDTD); ultra - wideband; bistatic RCS