

三角面元数据模型 FDTD 网格生成技术

杨利霞, 葛德彪, 白 剑, 张世田

(西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 提出了一种将描述目标表面形状的三角面元数据转换为时域有限差分(FDTD)目标几何模型的投影求交方法, 根据目标的介质信息得到相应位置 Yee 元胞的电磁参数, 得到目标的 FDTD 电磁模型. 给出了典型目标金属球和圆柱的 FDTD 网格模型, 计算得到的雷达散射截面(RCS)结果与其他方法符合很好. 另外, 还根据某导弹的三角面元数据给出了它的 FDTD 模型, 并计算其后向 RCS. 结果表明, 该方法可应用于复杂目标的 FDTD 计算建模.

关键词: 三角面元模型; 时域有限差分建模; 时域有限差分方法

中图分类号: TN011 文献标识码: A 文章编号: 1001-2400(2007)02-0298-05

A novel FDTD modeling technique based on triangle mesh-units of an object

YANG Li-xia, GE De-biao, BAI Jian, ZHANG Shi-tian

(School of Science, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel technique converting triangle mesh data to Yee's cell is proposed for finite-difference time-domain(FDTD) computation. In a rectangular coordinate system, based on the model of triangle mesh-units of a target, its FDTD geometry model is obtained by using the projection and cross-point method. At the same time, by recording the electromagnetic parameter of the Yee-cell, the FDTD electromagnetic model is given. In this paper, the typical objects as a perfectly conducting (PEC) sphere and a PEC column are modeled with the aid of this novel technique, and their Radar Scattering Sector (RCS) are calculated by using the FDTD method. The computational results agree with those by the other numerical methods. Finally, the FDTD model of one missile is presented using the novel technique, and its backscattering RCS is calculated by using the FDTD method. Results show that this novel technique is applicable, in particular, to the FDTD computation for complex objects.

Key Words: triangle face-units; finite-difference time-domain modeling; finite-difference time-domain method

电磁场数值计算与仿真中用到了多种数值方法, 如时域有限差分(FDTD)方法^[1]、矩量法(MoM)^[2], 多层快速多极子(MLFMA)方法^[3]等, 不同方法通常有不同的剖分单元, 其中 FDTD 方法是采用六面体(长方体)为基本计算单元, 而后两种方法一般采用三角面元作为计算单元. 并且这种三角面元的数据模型可从多种途径, 包括一些商用软件如 Supermesh, 3DMAX, ANSOFT 等得到.

笔者提出了一种将描述目标表面形状的三角面元数据转换为 Yee 元胞模型的 FDTD 网格生成技术. 利用这种技术, 将典型目标(金属球和圆柱)及复杂目标(某导弹)的三角面元模型转化为 FDTD 网格模型. 数值计算结果表明, 提出的根据三角面元数据模型进行复杂目标 FDTD 建模的可行性, 及适合于复杂目标已经具有三角面元剖分的情形.

收稿日期: 2006-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60371018)

作者简介: 杨利霞(1975-), 男, 西安电子科技大学博士研究生.

1 基于三角面元数据模型的 FDTD 网格生成技术

由三角面元模型数据出发建立目标的 FDTD 网格模型,关键是判断 FDTD 元胞是否位于目标内.对此采用目标表面三角面元与 FDTD 网格线的投影求交方法来进行分析.

1.1 三角面元与网格线的投影求交方法

求网格线与三角面元的交点时,首先求网格线与三角面元所在平面的交点,然后再判断该交点是否在三角面元内.先从目标的三角面元的数据文件中,读取每一个三角面元(设为 ABC) 的 3 顶点坐标,然后从 3 顶点坐标求得该三角面元所在平面的几何方程,最后联立平行于 z 轴的网格线 l 方程,就可求交点的坐标(设为 P 点,如图 1 所示).

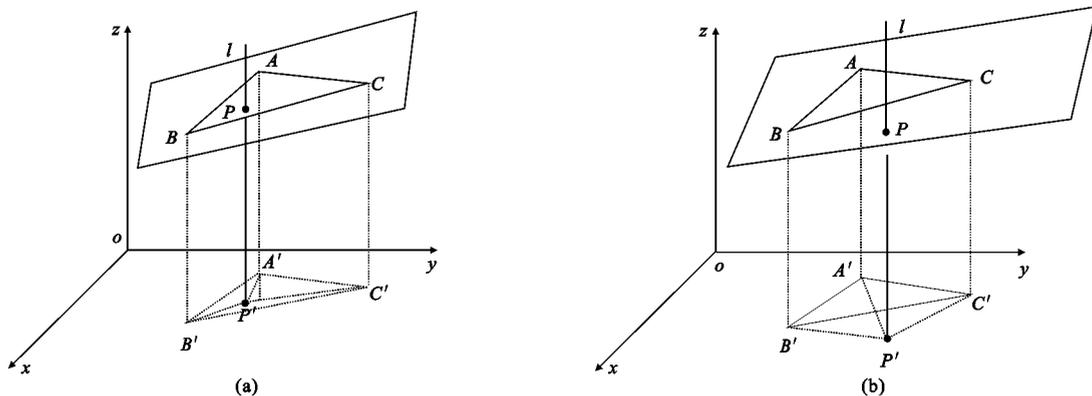


图 1 交点 P 与三角面元 ABC 的关系图

判断交点 P 是否在三角面元 ABC 内可利用 xy 面内的投影来分析.设三角面元 ABC 和交点 P 在 xy 面内的投影分别为 $A'B'C'$ 和 P' .图 1(a)表示交点在三角面元内,图 1(b)表示交点不在三角面元内.

将 P' 与投影三角形 $A'B'C'$ 的 3 个顶点可以构造 3 个矢量 $\vec{P'A}$, $\vec{P'B}$, $\vec{P'C}$, 并依次形成矢量叉乘,即 $\vec{P'A} \times \vec{P'B}$, $\vec{P'B} \times \vec{P'C}$ 和 $\vec{P'C} \times \vec{P'A}$.若 3 者彼此同号表示交点 P 在三角面元 ABC 内;反之,则交点 P 不在三角面元 ABC 内.当 P 正好在三角面元 ABC 边线上,3 者中有一个为零.

1.2 根据交点的位置进行 FDTD 建模

网格线与目标表面相交,有两种情况:相切,相交.求得这些交点后,先对切点单独进行 FDTD 标记;其余交点(贯穿点)将网格线分成若干线段,将这些线段顺序进行编号,对编号为奇数的区域即为目标区域,则在此目标区域内进行 FDTD 元胞标记和电磁参数赋值,进而生成用于 FDTD 计算的网格剖分数据文件.在这一步中,把那些中心位置在目标区域内的元胞标记为 1,否则为 0.

1.3 三角面元与网格线求交计算时的优化措施

网格线与三角面元求交有两种方法:(1)先给定网格线,对所有三角形面元逐一判断并确定与该网格线的交点;(2)先给定三角形面元,对所有网格线逐一判断并确定与三角形面元的交点.这里采用第(2)种方法.根据目标上三角形面元 ABC 的投影 $A'B'C'$ 的 3 顶点坐标值,分别求出它在 x 轴和 y 轴方向的最大及最小值 x_{\min} , x_{\max} , y_{\min} , y_{\max} .在编程时,可以只考虑这个矩形区域内的网格线与该面元相交情况.

综上所述,基于三角面元数据模型的目标 FDTD 网格生成的投影求交法的步骤为:

- 1) 求各三角面元在坐标平面 xy 上投影在 x 和 y 轴方向的最大与最小值.
- 2) 分别求出目标表面的各个三角形面元与网格线 $(i \cdot dx, j \cdot dy)$ 的交点,判断这些交点是否在三角面元内.若在相应三角面元内,记录上述每条网格线上的交点坐标.
- 3) 根据这些交点的坐标,判断 FDTD 元胞 (i, j, k) 是否位于目标内部(含目标表面).将在目标内的元胞标记为 1,否则标记为 0.
- 4) 用 AutoCAD 显示并检验目标按照 FDTD 网格剖分的结果.

2 算法的检验及误差分析

半径为 0.375 m 的金属球的三角面元模型如图 2(a) 所示. 为了检验上述 FDTD 网格生成技术, 根据该球的三角面元数据文件建立的 FDTD 模型如图 2(b) 所示, 与根据解析式建立的 FDTD 模型符合得比较好. 离散网格大小取为 0.01 m.

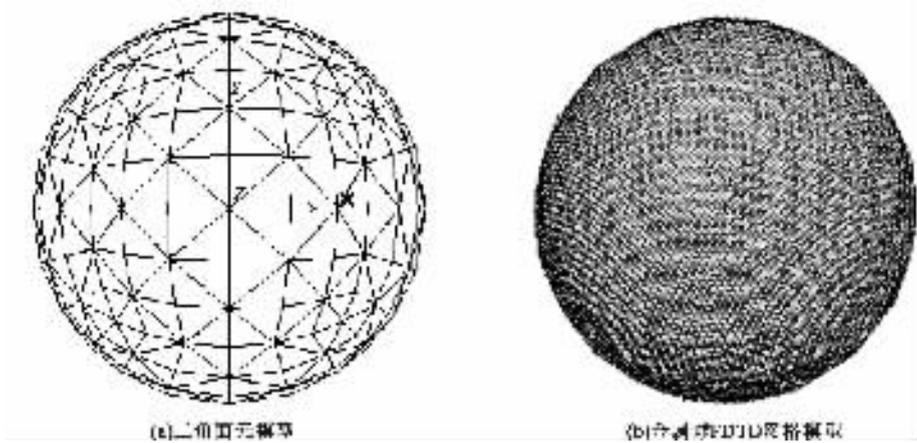


图 2 金属球模型

从上述两图可以看出, 两模型基本一样. 但是从图 2(b) 可以看出目标表面有“折皱”现象. 这是由于用三角形面片拟合弯曲表面时造成了一些棱边. 不同的三角面元划分可能导致目标表面处个别 FDTD 元胞位置或者在目标内, 或者在目标外的微小差别.

为了检验上述建模方法的精度, 对图 2(b) 及根据解析式建立的两模型, 分别求出它们的后向雷达散射截面(RCS). FDTD 计算中 $\delta=1$ cm, $\Delta t=\delta/(2c)$, c 为光速, 入射波为高斯脉冲, 计算结果如图 3 所示. 图 3(a) 为脉冲入射到金属球上的后向时域波形, 图 3(b) 为后向 RCS 随频率的变化, 图 3(b) 中的实线为 Mie 级数解.

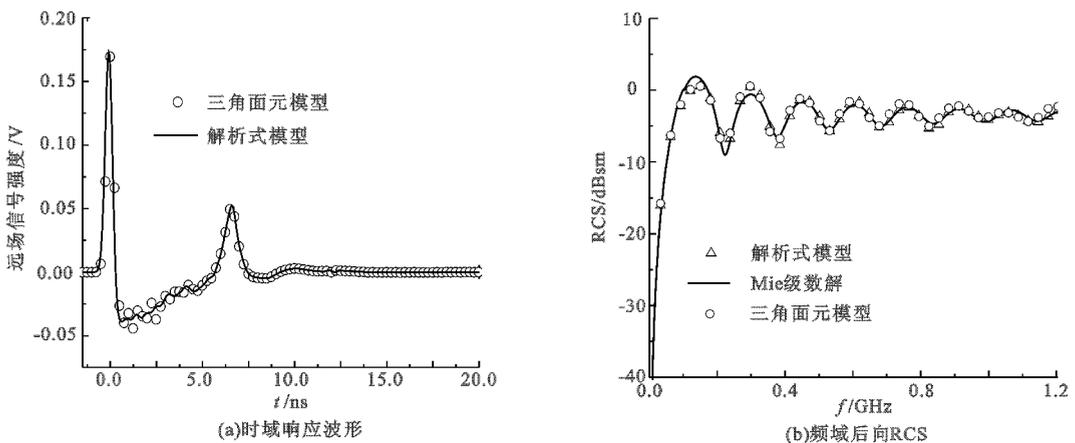


图 3 两种模型后向散射的比较

它们整体上吻合得比较好, 但从后向时域响应曲线(图 3(a))上可发现三角面元模型的曲线有着明显的抖动, 这是由于根据三角面元数据文件建立的 FDTD 网格模型的目标表面存在着一定的“折皱现象”而引起的. 而这种“折皱”在 FDTD 计算目标的散射场时引入了面元噪声^[5~7].

若定义某一频率范围内的均方根误差为

$$E = \sum_{n=1}^N [(R_{\text{FDTD}} - R_{\text{Mie}})^2]^{1/2} / N, \quad (1)$$

其中 N 为频率点的个数,与 Mie 级数解相比,在图 3(b)所示频率范围 $1.0 \sim 1.2$ GHz 内,取 $N=400$,可计算得到解析式模型的误差为 $E=3.91 \times 10^{-2}$ dBsm,由三角面元模型建模的误差为 $E=6.49 \times 10^{-2}$ dBsm.

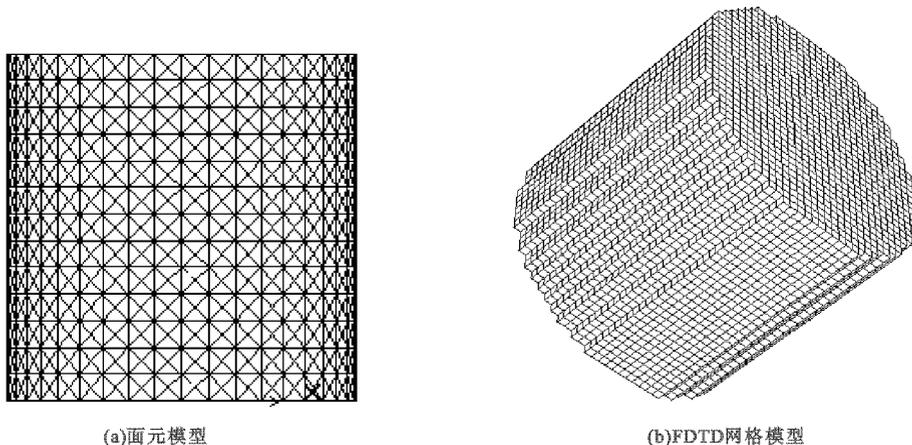


图 4 金属圆柱的两种模型

金属圆柱的三角面元模型如图 4(a)所示.金属圆柱的直径为 0.6λ 、高为 0.6λ , $\lambda = 0.032$ m.根据金属圆柱体的三角面元数据文件建立的 FDTD 模型如图 4(b)所示,与根据解析式建立的模型相符.用 FDTD 方法计算了该圆柱的双站 RCS,结果如图 5 所示.计算时平面波逆着 Z 轴入射 ($\theta = 180^\circ$),FDTD 元胞为 $\delta = \lambda/20$.为了比较,图中给出了矩量法的计算结果,图中结果表明两者吻合得很好.

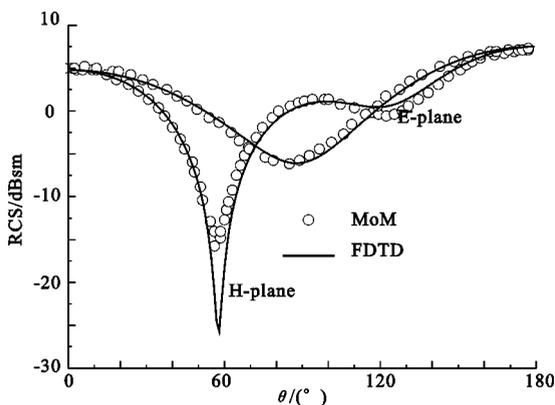


图 5 圆柱的单站 RCS

3 实用目标的数值结果

图 6(a)为某导弹的三角面元模型.应用文中方法建立的 FDTD 网格模型如图 6(b).离散网格尺寸为 $\delta=1$ cm,该导弹沿 3 个方向的最大尺寸为 $2.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$.由 FDTD 计算得到后向散射的时域波形和单站 RCS 分别如图 7(a)和(b)所示.计算中入射波为高斯脉冲,迎头入射,时间步 $\Delta t = \delta/(2c)$.

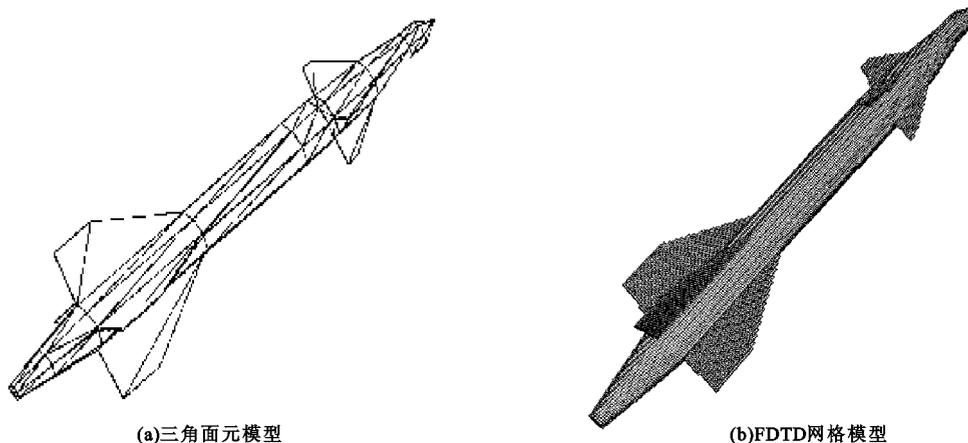


图 6 某导弹模型

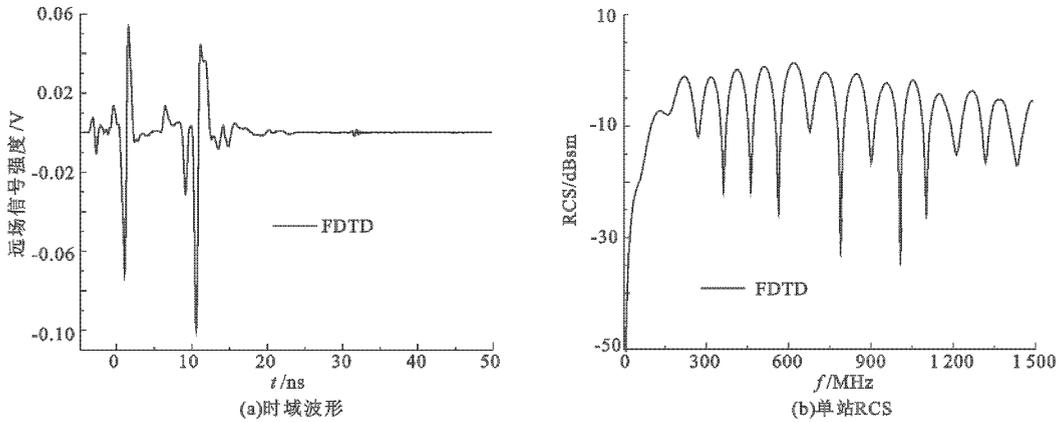


图 7 某导弹的后向散射

4 结束语

三角面元能精确地模拟复杂目标的表面,并且可以从商用软件中获得.在此基础上,提出了一种将目标三角面元数据转换为 Yee 元胞模型的投影求交方法.在直角坐标系下,先由三角面元数据文件得到目标的外接长方体,然后将此六面体向任一坐标平面进行投影,再从投影区域内对目标表面的每个三角面元利用投影求交的方法得到目标的 FDTD 网格模型.根据目标的三角面元数据文件能一次性地进行 FDTD 建模,人工参与的成份少,提高了 FDTD 的建模效率.另外,该方法还可进一步推广应用于目标中含有多种介质情形时的复杂目标的 FDTD 建模.

参考文献:

- [1] Taflove A, Hagness S. Computational Electrodynamics: the Finite-difference Time-domain Method [M]. Third Edition, Boston: Artech House, 2005.
- [2] Harrington R F. Field Computation by Moment Method[M]. New York: The Macmillan Company, 1968.
- [3] Song J M, Chew W C. Fast Multipole Method Solution of Combined Field Integral Equations [J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 1994, 7(16): 760-765.
- [4] Srisukh Y, Nehrbass J, Teixeira F L, et al. An Approach for Automatic Grid Generation in Three-dimensional FDTD Simulation of Complex Geometries [J]. IEEE Antenna and Propagation Magazine, 2002, 44(4): 75-80.
- [5] Elking D M, Roedder J M, Car D D, et al. A Review of High-frequency Radar Cross-section Analysis Capabilities at McDonnell Douglas Aerospace [J]. IEEE Antenna Propagation Magazine, 1995, 37(5): 33-43.
- [6] Miller E M, Andersh D J, Terzuoli A J. The Effect of Model Facetization on RCS Predictions[C]//Digest of the 1993 IEEE/AP-S International Symposium, Vol 3. Ann Arbor, MI: University of Michigan, 1993: 1404-1407.
- [7] Tang Song, Liu Qizhong. Facet Noise in RCS Prediction[J]. Journal of Xidian University, 2004, 30(4): 510-513.

(编辑: 齐淑娟)