



·高功率微波技术·

## 基于 JASMIN 平台的复合材料方舱 SE 快速评估

钟金逾<sup>1</sup>, 刘 强<sup>2</sup>, 闫丽萍<sup>1</sup>, 赵 翔<sup>1</sup>, 孟雪松<sup>2</sup>, 周海京<sup>2</sup>

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610065; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘 要:** 在时域有限差分 (FDTD) 法中采用亚网格边界条件 (SGBC) 法对复合材料薄层结构进行建模, 可以突破复合材料薄层对空间步长的限制从而大大降低计算成本。基于大规模并行化平台 JASMIN 实现了 SGBC-FDTD 算法, 通过对复合材料薄层结构的自动建模和适配, 实现对复合材料薄层的快速并行化处理。利用所开发的并行 SGBC-FDTD 算法计算分析了含不同电磁特性复合材料薄层方舱在 0.1~1.0 GHz 内的电磁屏蔽效能, 结果表明采用并行 SGBC-FDTD 算法的计算结果与全波分析软件计算结果吻合完好, 且计算效率显著提升。

**关键词:** 并行化; 复合材料; 亚网格边界条件法; 时域有限差分法; 屏蔽效能

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210048

## JASMIN-based fast shielding effectiveness prediction of enclosure containing thin composite layer

Zhong Jinyu<sup>1</sup>, Liu Qiang<sup>2</sup>, Yan Liping<sup>1</sup>, Zhao Xiang<sup>1</sup>, Meng Xuesong<sup>2</sup>, Zhou Haijing<sup>2</sup>

(1. Department of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The subgridding boundary condition (SGBC) based modeling of thin composite layer in Finite-Difference Time-Domain (FDTD) simulation of enclosures breaks the constraint that the mesh size should be less than the smallest dimension of thin composite layer to get more accurate results, and therefore greatly reduce the computational cost. A large-scale parallelization platform JASMIN based modeling method of SGBC-FDTD was developed. The thin composite layer can be automatically modeled and adaptively allocated in the developed parallelized SGBC-FDTD code. The parallelized SGBC-FDTD algorithm was used to analyze the electromagnetic shielding effectiveness of enclosures containing composite thin layers with different electromagnetic properties in the frequency range of 0.1–1.0 GHz. The results show that shielding effectiveness predicted using the parallelized SGBC-FDTD algorithm are in good agreement with the ones calculated by a full-wave analysis software, while the calculation efficiency is significantly improved.

**Key words:** parallelization; composite; subgridding boundary condition; finite-difference time-domain; shielding effectiveness

复合材料由于质量轻、强度高和易制造等优点, 被广泛用于大型装备如飞机、汽车外壳等的制造<sup>[1]</sup>。由于复合材料的电导率相对于金属材料较低, 因此包含复合材料的系统屏蔽效能评估成为电磁环境效应评估的重要环节<sup>[2-3]</sup>。复合材料的厚度通常为毫米级, 在采用时域有限差分 (FDTD) 法对其进行计算建模时, 为保证精度需将 Yee 氏网格划分为比复合材料薄层厚度更小的网格, 这将导致空间步长的减少。而空间步长的减少, 一方面会大幅增加空间中的总网格数, 导致计算机处理模型的内存开销增大; 另一方面受到 Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 稳定性条件<sup>[4]</sup>的影响, 时间步长也会相应减小, 导致计算时间增加。为解决该问题, 表面阻抗边界条件 (SIBC) 法<sup>[5]</sup>、阻抗网络边界条件 (INBC) 法<sup>[6]</sup>、有效边界条件 (EBC) 法<sup>[7]</sup>、传输线等效 (TLE) 法<sup>[3][8]</sup> 以及亚网格边界条件 (SGBC) 法<sup>[9]</sup> 等嵌入式薄层建模技术<sup>[10]</sup> 被提出。SIBC, INBC 和 EBC 算法要求电场和磁场在时间和空间上同步, 而 FDTD 法中电场和磁场在空间和时间上均相差半个步长, 因此必须进行场值外推, 从而导致计算后期不稳定。SGBC 法把复合材料薄

\* 收稿日期: 2021-02-08; 修订日期: 2021-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61877041)

作者简介: 钟金逾 (1996—), 男, 硕士, 主要从事电磁场数值计算与电磁环境效应评估方面的研究。

通信作者: 闫丽萍 (1972—), 女, 教授, 主要从事电磁兼容建模分析、电磁环境效应评估与电磁场数值计算等方面的研究。

层的一维亚网格嵌入到三维 Yee 氏网格中。当电磁波以任意的角度入射到复合材料薄层时,只要频率满足  $f/\text{GHz} < 1.8\sigma/(\text{kS}\cdot\text{m}^{-1})$ ,则折射角  $|\theta_r| < 10^{-2}$ ,此时折射波总是沿着复合材料薄层表面法线的方向传播<sup>[9]</sup>。因此可以用一维无条件稳定的 Crank-Nicolson Time-Domain(CNTD)方法<sup>[11]</sup>来计算复合材料薄层内部的电磁场,而薄层外部区域仍采用常规三维 Yee 氏 FDTD 法进行处理,并通过边界条件把一维亚网格和三维 Yee 氏网格中的电磁场联系起来。因而整个计算区域时间步长仍由三维 Yee 氏网格的 CFL 稳定性条件决定,不受复合材料薄层结构中亚网格步长的影响,可以实现对含复合材料薄层结构的快速计算。

本文在 JASMIN 并行化集成平台上实现了并行 SGBC-FDTD 算法,并将该算法用于含复合材料封闭方舱的电磁屏蔽效能(SE)评估中,通过与基于全波分析方法的时域商用软件仿真结果对比,验证了 JASMIN 平台上使用并行 SGBC-FDTD 算法评估复合材料方舱电磁屏蔽效能的有效性和高效性。在此基础上,对含非色散/色散复合材料的方舱 SE 进行评估,分析了复合材料在方舱腔壁上的分布对 SE 的影响。

## 1 基于 JASMIN 平台的 SGBC-FDTD 建模

### 1.1 色散媒质 SGBC-FDTD 算法简介

Cabello 等人首次提出了 SGBC-FDTD 算法<sup>[9]</sup>,并使用分段线性递归卷积(PLRC)离散时域本构关系,从而把 SGBC-FDTD 算法推广到色散媒质中<sup>[12]</sup>。式(1)为使用 PLRC 离散后的时域本构关系,式中  $\epsilon_\infty$  为高频极限下的介电常数。

$$\begin{cases} D_{y,l}^n = \epsilon_\infty E_{y,l}^n + \sum_{k=0}^{N_s} \zeta_{\epsilon,l,k}^n \\ \zeta_{\epsilon,l,k}^n = q_{2,\epsilon,k}(1-q_{3,\epsilon,k})E^n + q_{1,\epsilon,k}(1-q_{3,\epsilon,k})E^{n-1} + q_{3,\epsilon,k}\zeta_{\epsilon,l,k}^{n-1} \end{cases} \quad (1)$$

本文以介电常数色散的复合材料薄层为例,来介绍色散媒质的 SGBC-FDTD 算法原理。复合材料薄层的一维亚网格剖分如图 1 所示。根据全电流定律和法拉第电磁感应定律并结合式(1),用整时间步上的  $n$  和  $n+1$  时刻磁场/电场的平均值表示  $n+1$  时刻的电场/磁场,可得图 1 所示色散复合材料薄层内部一维亚网格电场  $E_y$  和磁场  $H_x$  的更新表达式分别为

$$\begin{cases} E_{y,l}^{n+1} = CA_l E_{y,l}^n + \frac{CB_l}{2} (H_{x,l+1/2}^{n+1} - H_{x,l-1/2}^{n+1} + H_{x,l+1/2}^n - H_{x,l-1/2}^n) + C_{\epsilon,l} \zeta_{\epsilon,l}^n \\ \zeta_{\epsilon,l}^n = \sum_{k=1}^{N_s} [q_{2,\epsilon,k}(1-q_{3,\epsilon,k})E^n + q_{1,\epsilon,k}(1-q_{3,\epsilon,k})E^{n-1} + q_{3,\epsilon,k}\zeta_{\epsilon,l}^{n-1}] \end{cases} \quad (2)$$

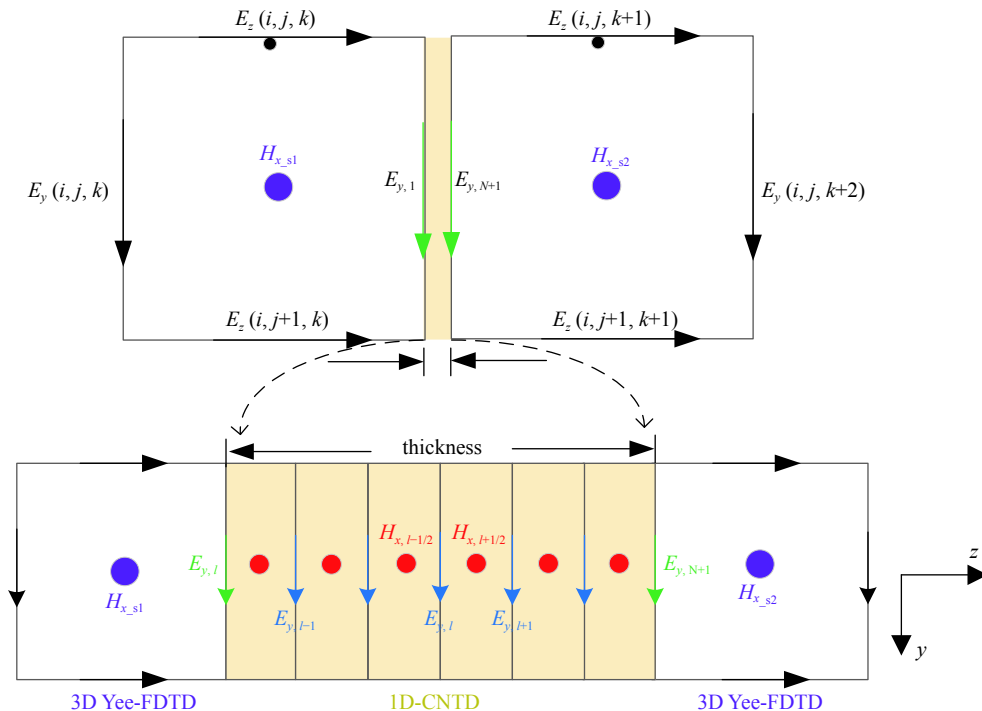


Fig. 1 Diagram of SGBC-FDTD method for dispersive composite thin slab

图 1 色散复合材料薄板的 SGBC-FDTD 算法示意图

$$H_{x,j+1/2}^{n+1} = DA_{j+1/2} H_{x,j+1/2}^n + \frac{DB_{j+1/2}}{2} (E_{y,j+1}^{n+1} - E_{y,j}^{n+1} + E_{y,j+1}^n - E_{y,j}^n) \quad (3)$$

将式(3)中的  $H_{x,j+1/2}^{n+1}$  替换式(2)中相应的磁场, 获得薄层内部各个节点上电场的三对角矩阵方程, 如式(4)所示。通过求解该矩阵方程, 可以得到薄层内各网格上的电场分量值, 再将其代入式(3)中, 即可求得薄层内各网格上的磁场分量。式(1)~(5)中的  $q, CA, CB, DA, DB, a_i, b_i, c_i, d_{y,i}^n$  和  $d_{\text{disp},i}^n$  等系数详见文献 [12]。

$$\begin{pmatrix} b_1 & c_1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_2 & b_2 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & a_l & b_l & c_l & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & c_N \\ 0 & \cdots & 0 & a_{N+1} & b_{N+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{y,1}^{n+1} \\ \cdots \\ E_{y,l}^{n+1} \\ \cdots \\ E_{y,N+1}^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{y,1}^n + C_{\zeta,1} \zeta_{e,1}^n \\ \cdots \\ d_{y,l}^n + C_{\zeta,l} \zeta_{e,l}^n \\ \cdots \\ d_{y,N+1}^n + C_{\zeta,N+1} \zeta_{e,N+1}^n \end{pmatrix} \quad (4)$$

根据边界条件, 采用显隐式混合(HIE)算法将色散薄层内部的一维亚网格和薄层周围的三维 Yee 氏粗网格连接起来。以图 1 色散薄层右表面上的电场  $E_{x,s2}$  和薄层附近网格上的磁场  $H_{x,s2}$  为例, HIE 算法的更新公式为

$$E_{y,N+1}^{n+1} = CA_{N+1} E_{y,N+1}^n + CB_{N+1} \left( H_{x,s2}^{n+1/2} - \frac{H_{x,N+1/2}^{n+1} + H_{x,N+1/2}^n}{2} \right) \quad (5)$$

$$H_{x,s2}^{n+1/2} = H_{x,s2}^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta S} [\Delta z E_z^n(i, j+1, k+1) - \Delta z E_z^n(i, j, k+1) + \Delta y E_{y,s2}^n - \Delta y E_y^n(i, j, k+2)] \quad (6)$$

式中:  $\Delta S$  为网格积分区域所围的面积。由此可见, 采用了无条件稳定 CNTD 算法的 SGBC-FDTD 算法时间步长不受 CFL 稳定性条件的约束, 从而提高了求解色散复合材料薄层的计算效率。

## 1.2 色散复合材料的 SGBC-FDTD 并行化

大规模并行自适应网格支撑平台(JASMIN)是由北京应用物理与计算数学研究所研制的可支撑物理建模、数值方法和高性能算法的计算平台<sup>[13-14]</sup>。SGBC-FDTD 的并行化方法与李俊辛等人提到的<sup>[15]</sup>类似, 为将数据进行有效并行化并实现并行 SGBC-FDTD 算法的自动适配, 在处理计算模型时主要将数据处理分为三个层, 即 User layer, Grid layer 和 Patch layer, 其并行化处理流程如图 2 所示。

在 User layer 中, 程序完成导入计算模型参数和复合材料参数的工作, 对于色散媒质还需要经过矢量拟合<sup>[16]</sup>的数据前处理过程, 把介电常数和磁导率的频率响应拟合为式(7)所示的有理分式形式, 方便 FDTD 计算。

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{eff}}(\omega) = \sum_{k=1}^{N_e} \frac{R_{\varepsilon,k}}{j\omega - p_{\varepsilon,k}} \\ \mu_{\text{eff}}(\omega) = \sum_{k=1}^{N_\mu} \frac{R_{\mu,k}}{j\omega - p_{\mu,k}} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $R_{\varepsilon,k}$  和  $p_{\varepsilon,k}$  为矢量拟合获得的留数和极点。

Grid layer 则根据模型材料类型完成常规 FDTD 粗网格和复合材料薄层中亚网格的剖分。然后将场更新公式中所有系数初始化, 并将这些系数保存到数组中以便程序调用和提高计算效率。最后将存储电磁场的变量初始化, 并把系数和变量分配到 Patch layer 中。

Patch layer 则接收 Grid layer 对模型的网格剖分信息, 根据这些信息将计算数据划分到各个子计算空间(Patch), 对复合材料薄层亚网格区域调用 SGBC-FDTD 计算模块, 而对其他粗网格区域则调用常规的 FDTD 计算模块, 同时调用模块所对应的系数和变量, 实现并行计算。

## 1.3 算法验证和适用性分析

为验证并行 SGBC-FDTD 算法在 JASMIN 并行化计算平台编程的有效性, 对图 3(a) 所示的方舱模型分别采用

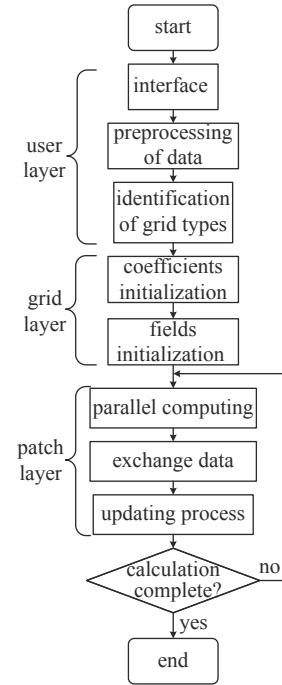


Fig. 2 Flow chart of parallelized SGBC-FDTD algorithm on JASMIN platform

图 2 基于 JASMIN 平台的并行 SGBC-FDTD 算法流程图

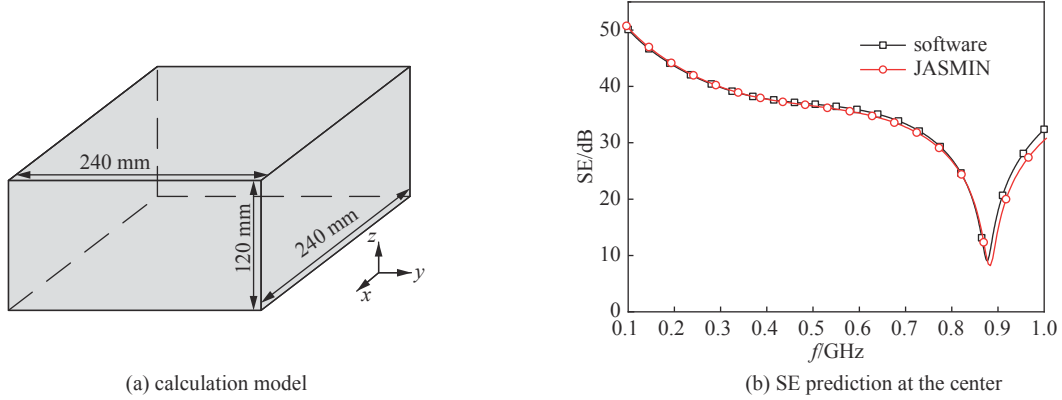


Fig. 3 Calculation model and shielding effectiveness (SE) prediction of the enclosure with six composite panels

图 3 六面为复合材料的方舱计算模型及屏蔽效能

并行 SGBC-FDTD 算法和基于全波分析的时域商业软件进行计算对比。图中方舱的尺寸为 240 mm×240 mm×120 mm, 腔壁均为厚 2 mm,  $\epsilon_r = 2$ ,  $\sigma = 200$  S/m 的非色散复合材料。计算区域中粗网格空间步长为 5 mm, 薄层内部细网格空间步长为 0.25 mm, 整个计算区域的时间步长为  $\Delta t = \frac{0.7}{c \sqrt{(1/\Delta x)^2 + (1/\Delta y)^2 + (1/\Delta z)^2}}$ , 激励波形为高斯脉冲。

选取腔体中心位置作为电磁屏蔽效能 SE 的监测点, 垂直极化平面波沿 +x 方向垂直入射到该方舱模型, 使用基于 JASMIN 平台的并行 SGBC-FDTD 算法和仿真软件分别计算了 0.1~1.0 GHz 的 SE, 结果如图 3(b) 所示。为了定量描述计算结果的准确性, 使用平均绝对差值(MAD)和曲线相关系数( $\rho$ )<sup>[17]</sup> 对计算结果进行评估, MAD 越小、 $\rho$  越接近于 1, 则说明两条曲线的数值和变化趋势吻合度越高。

从图 3(b) 中可以看出, 并行 SGBC-FDTD 算法计算的 SE 与软件仿真结果吻合良好, 平均绝对差值 MAD 为 0.589 dB, 曲线相关系数  $\rho = 0.9965$ ; 且腔体谐振点与理论解析值一致, 表明了并行 SGBC-FDTD 算法在 JASMIN 平台并行化建模和计算的有效性。考虑计算时间成本, 文中算例的频率范围仅到 1 GHz, 但 SGBC-FDTD 算法仅受其适用性条件限制, 并不限于该频率范围。

为了进一步探究粗细网格步长比(RCF)对于计算精度的影响, 计算区域粗网格空间步长设置为 5 mm, 将薄层一维细网格剖分为不同精度, 其他参数设置同前。不同粗细网格步长比情况下并行 SGBC-FDTD 算法的结果与软件仿真结果的平均绝对差值(MAD)和曲线相关系数( $\rho$ )如表 1 所示。可以看出, 随着粗细网格比的增加,  $\rho$  逐渐增加; 但当 RCF 大于 40 后, 随着 RCF 增加  $\rho$  保持不变。而随着粗细网格比的增大, 尽管 MAD 也在增大, 但 RCF 大于 40 后, MAD 增大幅度逐渐减小。综合考虑计算精度和计算成本, 后续算例中选取粗细网格比为 40 进行计算, 即复合材料薄层内部细网格空间步长为 0.125 mm。

为了探究时间步长对于计算精度的影响, 将薄层一维细网格步长设置为 0.125 mm, 改变整个计算区域的时间步长公式  $\Delta t = \frac{a}{c \sqrt{(1/\Delta x)^2 + (1/\Delta y)^2 + (1/\Delta z)^2}}$  中系数 a 的大小, 获得不同时间步长情况下并行 SGBC-FDTD 算法计算得到的 SE 与软件仿真 SE 的平均绝对差值(MAD)和曲线相关系数( $\rho$ ), 如表 2 所示。可以看出除了 a 为 0.4 时, 其他情况的  $\rho$  均为 0.9965, 当 a=0.5 时, MAD 最小。综合考虑到平均绝对差值和计算成本, 后续算例取 a=0.6 进行计算, 即时间步长为

$$\Delta t = \frac{0.6}{c \sqrt{(1/\Delta x)^2 + (1/\Delta y)^2 + (1/\Delta z)^2}}$$

表 1 MAD 和  $\rho$  随粗细网格步长比的变化

Table 1 Variations of MAD and  $\rho$  with respect to the step size ratio of coarse (RCF) and fine meshes

RCF	MAD/dB	$\rho$
10	0.5410	0.9962
20	0.5888	0.9964
40	0.6017	0.9965
60	0.6040	0.9965
80	0.6049	0.9965
100	0.6053	0.9965
200	0.6058	0.9965
250	0.6058	0.9965

表 2 MAD 和  $\rho$  随时间步长的变化

Table 2 Variations of MAD and  $\rho$  with respect to time step

a	MAD/dB	$\rho$
0.4	0.5874	0.9963
0.5	0.5864	0.9965
0.6	0.5925	0.9965
0.7	0.6040	0.9965
0.8	0.6025	0.9965
0.9	0.6041	0.9965

## 2 并行 SGBC-FDTD 算法在复合材料方舱 SE 评估中的应用

### 2.1 含非色散复合材料方舱的 SE 评估

当复合材料为非色散媒质时,材料的介电常数和磁导率不随频率变化。采用并行 SGBC-FDTD 算法分析了单面、相邻双面和六面为复合材料的三种方舱(见图 4)腔体中心点的电磁屏蔽效能,计算中非复合材料腔壁设置为理想导体。复合材料薄层的厚度均为 2 mm,相对介电常数  $\epsilon_r = 2$ ,电导率  $\sigma = 200 \text{ S/m}$ 。垂直极化( $\alpha = 0^\circ$ )平面波斜入射到方舱模型,入射角  $\theta = 90^\circ, \varphi = 135^\circ$ 。此时,SGBC-FDTD 计算的频率范围虽然不满足条件  $f/\text{GHz} < 1.8\sigma/(\text{kS} \cdot \text{m}^{-1})$ ,但当入射电磁波的频率为 1 GHz 时,其折射角  $\theta_t$  仅为 0.012,因此折射波可近似为沿着复合材料薄层表面法线方向传播。其他计算参数设置如下:计算区域中粗网格空间步长为 5 mm,薄层内部细网格空间步长为 0.125 mm,整个计算区域的时间步长为  $\Delta t = \frac{0.6}{c\sqrt{(1/\Delta x)^2 + (1/\Delta y)^2 + (1/\Delta z)^2}}$ ,激励波形为高斯脉冲。

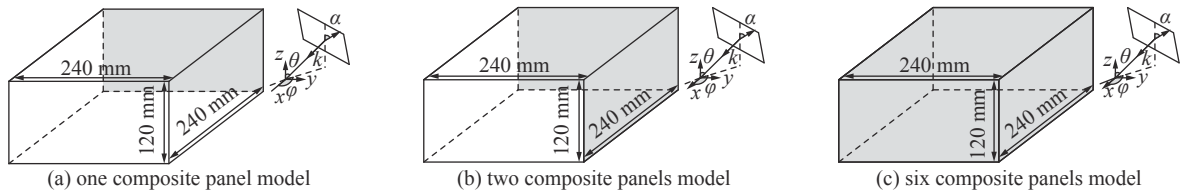


Fig. 4 Calculation models of enclosures with composite panels

图 4 含复合材料方舱的计算模型

对三种复合材料方舱中心点 SE 的计算结果如图 5 所示。由图中可知,并行 SGBC-FDTD 算法与软件计算结果吻合较好,单面、双面和六面复合材料方舱两种方法结果的平均绝对差值和曲线相关系数分别为: MAD 为 0.830 dB,  $\rho = 0.985$ (单面); MAD 为 2.55 dB,  $\rho = 0.968$ (双面); MAD 为 0.512 dB,  $\rho = 0.997$ (六面)。图 5(d) 给出了三种方舱模型的 SE 对比,可以发现随着复合材料面板数量的增多,腔体中心点的 SE 逐渐下降,双面模型的 SE 比单面模型下降了约 4.5 dB,而六面模型的 SE 则下降了约 13 dB。这是由于复合材料电导率较低,随着复合材料面板数量的

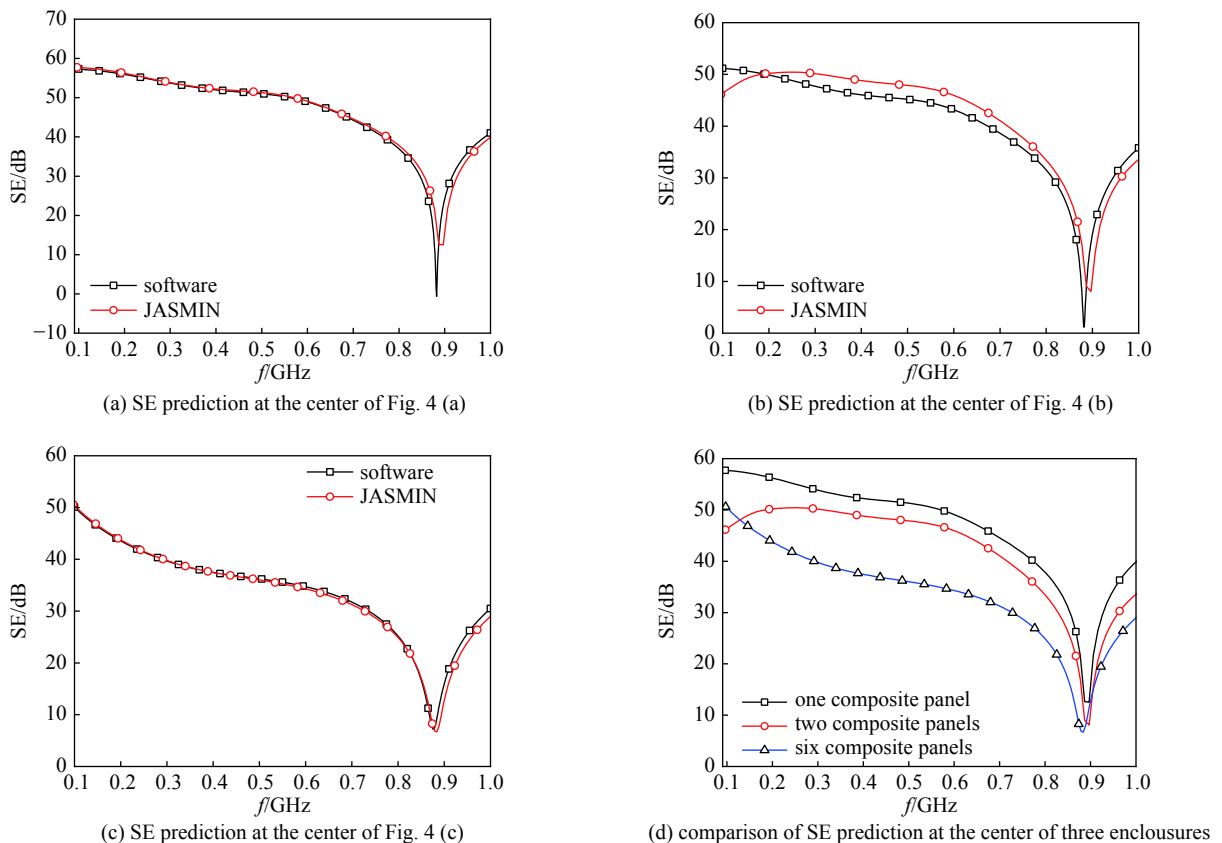


Fig. 5 SE prediction of enclosures containing nondispersive composite panels

图 5 非色散复合材料平板的方舱的 SE

增加,透射进入方舱的电磁能量逐渐升高导致的。并行 SGBC-FDTD 算法计算结果与软件仿真结果之间谐振点的微小偏移,是由于二者网格剖分有一定差异,SGBC-FDTD 算法中 SE 计算时所用场值并非腔体内正中心的场值导致的。

## 2.2 含色散复合材料方舱的 SE 评估

对于色散复合材料,其介电常数或磁导率随频率变化。这里以一种满足 Debye 模型的色散复合材料<sup>[18]</sup>为例进行计算。

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \left[ \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{s1} - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau_1} + \frac{\varepsilon_{s2} - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau_2} \right] \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon_{s1}$ 和 $\varepsilon_{s2}$ 为静态相对介电常数,  $\varepsilon_{s1} = 5.2, \varepsilon_{s2} = 3.7$ ;  $\varepsilon_\infty$ 为高频极限下的介电常数,  $\varepsilon_\infty = 3.7$ ;  $\tau_1$ 和 $\tau_2$ 为弛豫时间,  $\tau_1 = 5.27 \times 10^{-10}, \tau_2 = 0$ 。为了适用于 SGBC-FDTD 计算,需将该色散材料介电常数的频率响应代入矢量拟合程序中,计算获得式(7)中介电常数的四阶极点 $p_{\varepsilon,k}$ 和留数 $R_{\varepsilon,k}$ ( $k=4$ ),如表3所示,该复合材料的实际介电常数频率响应和矢量拟合结果对比如图6所示。将该色散复合材料用于图4中三种方舱模型,设复合材料的厚度为2 mm,电导率为1000 S/m。垂直极化平面波斜入射到方舱模型,入射角为 $\theta=90^\circ, \varphi=135^\circ$ ,其他计算参数设置同2.1节,方舱中心点 SE 计算结果如图7所示。

表 3 拟合得到留数与极点

Table 3 Residues and poles obtained by vector fitting

$R_{\varepsilon,k}$	$p_{\varepsilon,k}$
-9.993+0.0j	-3.737+0.0j
5.129+0.0j	-1.898+0.0j
-2.194+0.0j	-0.323+0.0j
1.699+0.0j	-0.253+0.0j

采用并行 SGBC-FDTD 算法和仿真软件两种方法,计算结果的平均绝对差值和曲线相关系数分别为: MAD 为 0.787 dB,  $\rho=0.951$ (单面); MAD 为 2.45 dB,  $\rho=0.942$ (双面); MAD 为 0.817 dB;  $\rho=0.985$ (六面)。证明了并行 SGBC-FDTD 算法的有效性。两种方法计算得到的色散复合材料方舱的 SE 结果平均绝对差值略高于非色散复合材料方舱的结果,但是相关系数和非色散复合材料方舱相比较差,这是由介电常数矢量拟合带来的误差造成的。从图7(d)中可以看出,随着复合材料面板的增多,色散复合材料方舱腔体中心点 SE 逐渐降低,与图5中非色散方舱 SE 的变化趋势相同。对比图5和图7,由于非色散复合材料的电导率 $\sigma=200$  S/m,而色散复合材料的电导率 $\sigma=1000$  S/m,色散复合材料方舱的 SE 比非色散复合材料方舱的 SE 高约 20 dB。对比图5和图7可知,色散复合材料方舱 SE 随频率的变化与非色散复合材料方舱 SE 略有不同,这是由复合材料的色散特性导致的。

## 2.3 计算效率评估

本文基于 JASMIN 并行化平台的并行 SGBC-FDTD 算法在具有 18 个物理核心的 Intel Xeon E5-2695 v4 处理器和 32 GB 内存的工作站上运行,仿真软件使用同样配置的工作站进行计算。表4给出了 JASMIN 平台上并行 SGBC-FDTD 算法与常用商用软件采用时域求解器计算所有算例的计算成本对比。从表中可知,软件计算的总网格数是并行 SGBC-FDTD 算法的 16.6 倍以上,而并行 SGBC-FDTD 算法的计算时间相比软件减少了 92.5% 以上。因此,基于 JASMIN 平台的并行 SGBC-FDTD 算法可以显著提升计算效率,降低计算成本。如果采用更多物理核心的计算机进行计算,所需时间还会进一步减少,这对于计算含复合材料薄层的大型系统如飞机、汽车的电磁效应评估尤其具有重要意义。

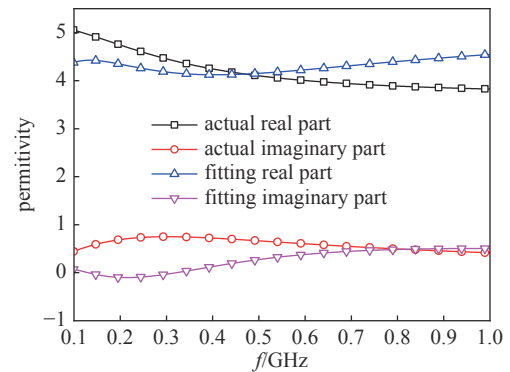


Fig. 6 Comparison between fitting values and actual values of permittivity

图 6 介电常数拟合值与实际值对比

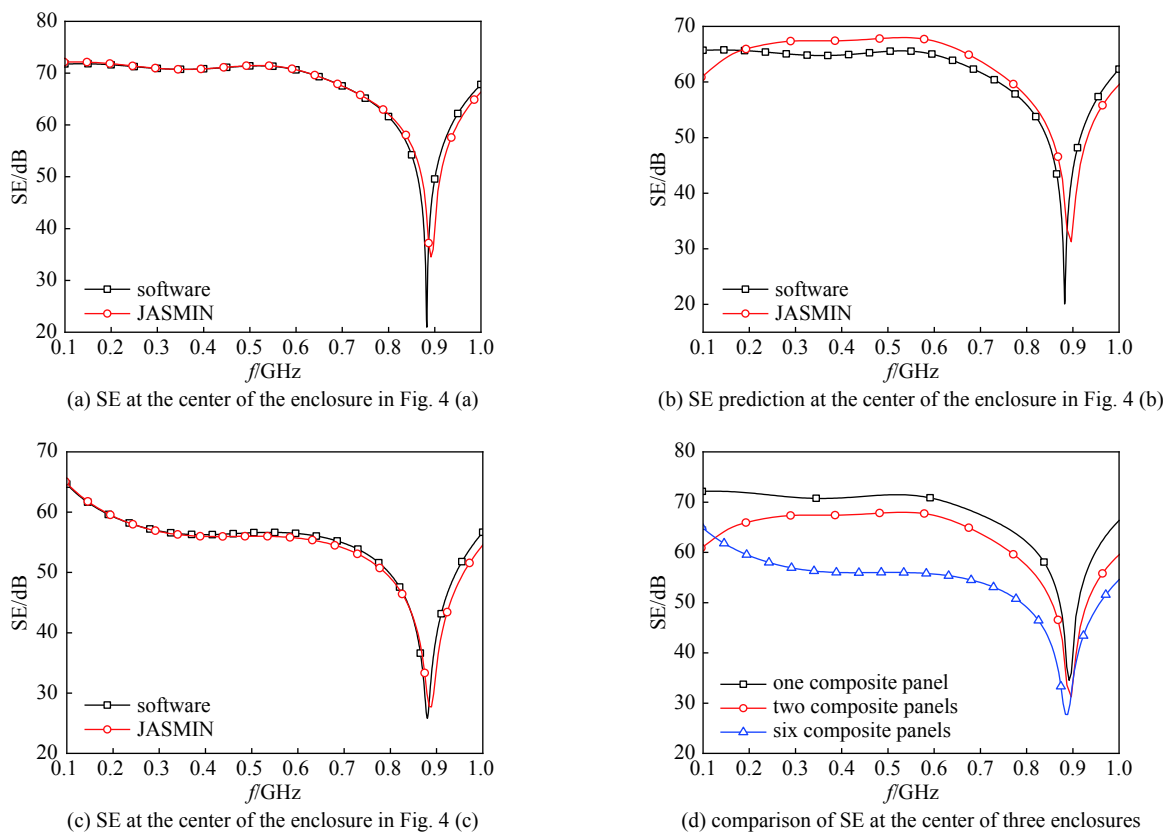


Fig. 7 SE prediction of enclosures containing dispersive composite panels

图 7 色散复合材料方舱的 SE

表 4 软件与 SGBC-FDTD 的计算成本对比

Table 4 Comparison of calculation cost between commercial software and SGBC-FDTD

model	type	method	total cells	computation time/s
model in Fig.3	nondispersive	software	$2.31 \times 10^7$	27950
		SGBC-FDTD	$0.64 \times 10^6$	1181
model in Fig.4(a)	nondispersive	software	$1.43 \times 10^7$	66761
		SGBC-FDTD	$0.71 \times 10^6$	1056
model in Fig.4(a)	dispersive	software	$1.23 \times 10^7$	19586
		SGBC-FDTD	$0.71 \times 10^6$	1467
model in Fig.4(b)	nondispersive	software	$2.36 \times 10^7$	28067
		SGBC-FDTD	$0.71 \times 10^6$	1537
model in Fig.4(b)	dispersive	software	$1.29 \times 10^8$	141281
		SGBC-FDTD	$0.71 \times 10^6$	2540
model in Fig.4(c)	nondispersive	software	$2.31 \times 10^7$	31315
		SGBC-FDTD	$0.64 \times 10^6$	1523
model in Fig.4(c)	dispersive	software	$1.26 \times 10^8$	144824
		SGBC-FDTD	$0.64 \times 10^6$	2501

### 3 结论

本文基于 JASMIN 并行化集成平台实现了 SGBC-FDTD 算法的并行化,并将该并行算法用于含复合材料方舱的电磁屏蔽效能评估中。首先对比了基于 JASMIN 平台的并行 SGBC-FDTD 方法与仿真软件计算结果,二者吻合较好,验证了本文方法及其编程实现的有效性。在此基础上使用并行 SGBC-FDTD 方法分析了含不同复合材料面

板数量和不同色散特性的方舱模型的屏蔽效能,相比于基于全波分析的商用计算软件,并行 SGBC-FDTD 方法的计算效率提高了 92.5%,且所耗内存大大降低。这些结果表明基于 JASMIN 并行化集成平台实现的并行 SGBC-FDTD 算法在含复合材料大型系统电磁效应评估方面具有重要的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] Wang Jianbao, Zhou Bihua, Shi Lihua, et al. Analyzing the electromagnetic performances of composite materials with the FDTD method[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(5): 2646-2654.
- [2] 王富强, 马晨, 王东红, 等. 屏蔽复合材料设备舱电磁脉冲屏蔽效能[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 103245. (Wang Fuqiang, Ma Chen, Wang Donghong, et al. Electromagnetic pulse shielding effectiveness of the conductive composites equipment compartment[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 103245)
- [3] 孟雪松, 鲍献丰, 刘德赞, 等. 嵌入式薄片模型在时域有限差分算法中的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 123203. (Meng Xuesong, Bao Xianfeng, Liu Deyun, et al. Embedded thin film model in finite difference time domain method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 123203)
- [4] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 3版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011. (Ge Debiao, Yan Yubo. Finite-difference time-domain method for electromagnetic waves[M]. 3rd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2011)
- [5] Maloney J G, Smith G S. The use of surface impedance concepts in the finite-difference time-domain method[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1992, 40(1): 38-48.
- [6] Feliziani M, Maradei F, Tribellini G. Field analysis of penetrable conductive shields by the finite-difference time-domain method with impedance network boundary conditions (INBCs)[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1999, 41(4): 307-319.
- [7] Sarto M S. A new model for the FDTD analysis of the shielding performances of thin composite structures[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1999, 41(4): 298-306.
- [8] Meng Xuesong, Vukovic A, Benson T M, et al. Extended capability models for Carbon Fiber Composite (CFC) panels in the Unstructured Transmission Line Modeling (UTLM) method[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, 58(3): 811-819.
- [9] Cabello M R, Angulo L D, Alvarez J, et al. A hybrid Crank-Nicolson FDTD subgridding boundary condition for lossy thin-layer modeling[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(5): 1397-1406.
- [10] Meng Xuesong. Modelling multi-scale problems in the transmission line modelling method[D]. Nottingham, U K: University of Nottingham, 2014.
- [11] Zhu Hui, Gao Cheng, Chen Hailin. An unconditionally stable radial point interpolation method based on Crank-Nicolson scheme[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16(99): 393-395.
- [12] Cabello M R, Angulo L D, Alvarez J, et al. Subgridding boundary conditions to model arbitrarily dispersive thin planar materials[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(11): 6424-6434.
- [13] 莫则尧, 张爱清. 并行自适应结构网格应用支撑软件框架(JASMIN 2.0版)用户指南[M]. 2011. (Mo Zeyao, Zhang Aiqing. User guide of J parallel adaptive structured mesh applications infrastructure (JASMIN 2.0)[Z]. 2011)
- [14] 张青洪, 廖成, 李瀚宇, 等. 基于JASMIN框架的抛物方程有限差分算法并行计算及其应用[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 083204. (Zhang Qinghong, Liao Cheng, Li Hanyu, et al. Parallel computing of finite difference algorithm for parabolic equation based on JASMIN and its application[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 083204)
- [15] 李俊辛, 刘强, 闫丽萍, 等. 基于JASMIN的并行CP-FDTD建模与屏蔽效能评估应用[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 053202. (Li Junxin, Liu Qiang, Yan Liping, et al. JASMIN-based parallel CP-FDTD modeling and application to shielding effectiveness prediction[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 053202)
- [16] Gustavsen B, Semlyen A. Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, 14(3): 1052-1061.
- [17] 方明江, 刘强, 闫丽萍, 等. 含三维复杂工程细缝金属腔的电磁屏蔽效能评估[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 073201. (Fang Mingjiang, Liu Qiang, Yan Liping, et al. Evaluation of electromagnetic shielding effectiveness for metallic enclosure with three-dimensional complex thin slots[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 073201)
- [18] Elmaghoub K, Elsherbeni A Z, Yang Fan. Dispersive periodic boundary conditions for finite-difference time-domain method[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(4): 2118-2122.