

文章编号: 1001-2486(2003)02-0073-03

驻波—行波边界条件在 PSTD 算法中的实现*

张伟军, 柴舜连, 刘克成, 毛钧杰

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 将时域伪谱法(PSTD)的边界条件 PML 用驻波—行波边界条件来代替。该条件在边界处附加理想电(磁)壁对计算区域进行截断, 将由此产生的反射场去除, 从而减少反射场所产生的干扰, 在有限的空间内有效地模拟出无限大的电磁散射空间。给出了该边界条件下的二维 PSTD 迭代格式, 并将其数值结果与运用 PML 边界条件的 PSTD 的结果进行比较, 计算结果表明这种结合形成的新方法节约了内存, 提高了计算速度, 具有良好的可行性。

关键词: 驻波—行波条件; 时域伪谱法; PML

中图分类号: TN011 **文献标识码:** B

Standing-traveling Wave Boundary Condition for the PSTD Algorithm

ZHANG Wei Jun, CHAI Shun-lian, LIU Ke-cheng, MAO Jun-jie

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The paper applies the standing-traveling wave boundary condition to the PSTD method to replace the PML. In this boundary condition, electric or magnetic walls are placed around the domain to be calculated, and the reflection field is removed from the scattering incident wave. The formulation for the method in the condition of 2D is given. The method can save more memory and time than that of the PML when their results are compared. The numerical result shows that the new method is feasible.

Key words: standing-traveling wave boundary condition (STWBC); PSTD; PML

时域伪谱(PSTD)方法于 1997 年由 Q. H. LIU 提出, 该方法成功地模拟了地下目标电磁和声波散射特性^[1], 并运用于各向异性的损耗介质之中^[2], 是一种较新的数值方法。该方法最大的特点是在麦克斯韦方程中利用傅立叶变换及反变换来完成空间微分, 这不同于 FDTD 方法的中心差分。由于 FFT 理论上精度可以无限高, 在每一个最小波长上只需要剖分成两个网格, 从而对计算机的内存和计算量的需求大为降低, 具备了对电大尺寸物体进行计算的特点, 因而受到越来越多的青睐^[3]。

针对傅立叶变换只适用于空间周期问题, 一般利用 PML 衰减来自其它周期的波, 这样使两个周期的边缘值不会迭加, 消除了周期性串扰, 使该方法能应用于一般性的问题。然而在 PSTD 中 PML 层数一般比 FDTD 要多, 占用的内存较大, 影响了计算速度。本文将驻波—行波条件^[4,5]运用于 PSTD 方法中。

1 驻波—行波截断边界条件

驻波—行波条件(STWBC)的基本原理^[6]是: 当散射场遇到边界的理想导体后, 发生全反射。若放置的导体是理想导电(磁)体, 则切向电(磁)场为零, 切向磁(电)场是入射场的两倍。在导体边界面上, 根据全反射原理, 可以得到反射场的大小和方向, 将反射场去除, 保留入射场部分, 波便以行波状态传播。

驻波—行波条件与 PML 边界条件相同, 都是在边界处加理想导体进行截断, 但前者不附加吸收

* 收稿日期: 2002-08-30

作者简介: 张伟军(1972—), 男, 工程师, 硕士。

层,不对外行波进行吸收和衰减,而是人为地将反射波去除,保留了入射场。由于 PSTD 具有时序性,经过这样处理的前后两个周期的波互不干扰,因而能将该条件运用于 PSTD 方法之中。

以 TM 波为例,如图 1 所示,当散射场到达理想导体边界时,发生全反射。应当注意,在 PSTD 方法中,电场与磁场的相对位置不同于 FDTD,它们处于同一网格中心上,这是与利用谱方法来求导密切相关的。在导体右边界($X = I_x$)处,总电场 $E_z^t(I_x) = 0$,而总磁场 $H_y^t(I_x) = 2 \cdot H_y^s(I_x)$,其中 $H_y^s(I_x)$ 为入射的散射场,其值为总场值的一半,用 $H_y^s(I_x)$ 参与迭代,便人为地将理想导体全反射造成的驻波状态转化为自由空间的行波状态,从而消除了反射的干扰。其余边界的处理同上。

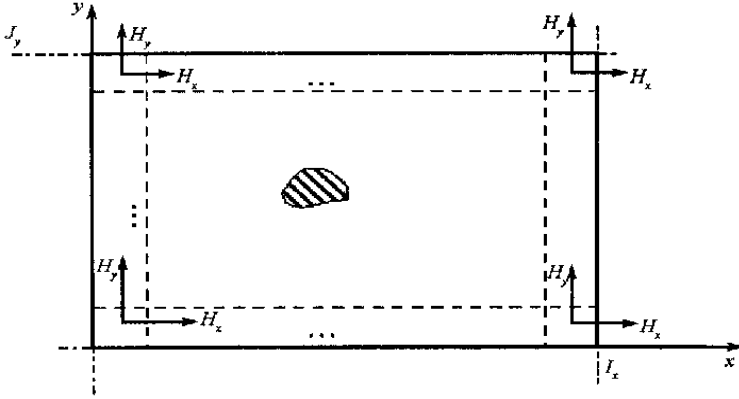


图 1 驻波—行波边界条件

Fig. 1 The standing-traveling wave boundary condition

2 STWBC 在 PSTD 中的运用

在驻波—行波边界条件下的 PSTD 的差分格式如下。

自由空间任意网格点磁场方程^[3]为:

$$H_x^{n+1/2}(i_x + 1/2, j_y + 1/2) = H_x^{n-1/2}(i_x + 1/2, j_y + 1/2) + \frac{\Delta t}{\mu_0} \int_{-\infty}^{\infty} E_z^n(x, k_y) j 2\pi k_y e^{j2\pi k_y y} dk_y \quad (1)$$

$$H_y^{n+1/2}(i_x + 1/2, j_y + 1/2) = H_y^{n-1/2}(i_x + 1/2, j_y + 1/2) + \frac{\Delta t}{\mu_0} \int_{-\infty}^{\infty} E_z^n(k_x, y) j 2\pi k_x e^{j2\pi k_x x} dk_x \quad (2)$$

(1) 式中:

$$E_z^n(x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} E_z^n(x, y) e^{-j2\pi k_y y} dy$$

(2) 式中:

$$E_z^n(k_x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} E_z^n(x, y) e^{j2\pi k_x x} dx$$

当 $I = I_x - 1, 0$ 时,

$$H_y^n(I + 1/2, j_y + 1/2) = 1/2 \cdot H_y^{n-1}(I + 1/2, j_y + 1/2) \quad (3)$$

当 $J = J_y - 1, 0$ 时,

$$H_x^n(i_x + 1/2, J + 1/2) = 1/2 \cdot H_x^{n-1}(i_x + 1/2, J + 1/2) \quad (4)$$

自由空间中任意网格点的电场

$$E_z^{n+1}(i_x + 1/2, j_y + 1/2) = E_z^n(i_x + 1/2, j_y + 1/2) + \frac{\Delta t}{\epsilon} \left[\int_{-\infty}^{\infty} 2\pi j k_x H_y(k_x, y) e^{j2\pi k_x x} dk_x - \int_{-\infty}^{\infty} 2\pi j k_y H_x(x, k_y) e^{j2\pi k_y y} dk_y \right] \quad (5)$$

对于一维和三维的电磁场方程,根据在边界上只对切向磁场进行处理的原则,很容易推导出来。

3 应用举例

以二维问题为例,发射机处于室外的某一位置,如图 2 所示。发射的信号为高斯脉冲, $H_y^n(I_s) =$

$\exp[-(n - n_0)^2 / n_r^2]$, 式中 $n_0 = 40$, $n_r = 12.9$, 接收位置位于虚线处。首先对点源进行空间等效, 使等效后的空间光滑源在每个方向占据 4~6 个网格, 这样有利于消除吉布斯现象, 然后利用具有 PML 边界的 PSTD 计算虚线处的场强, 经过的时间步数为 1500, 在主频为 800MHz 的计算机上所需的时间为 79.8s, 结果如图 3 的虚线所示。接着利用驻波一行波边界的 PSTD 进行计算, 经过相同时间步数, 所需的时间为 69.5s, 结果如图 3 的实线所示。

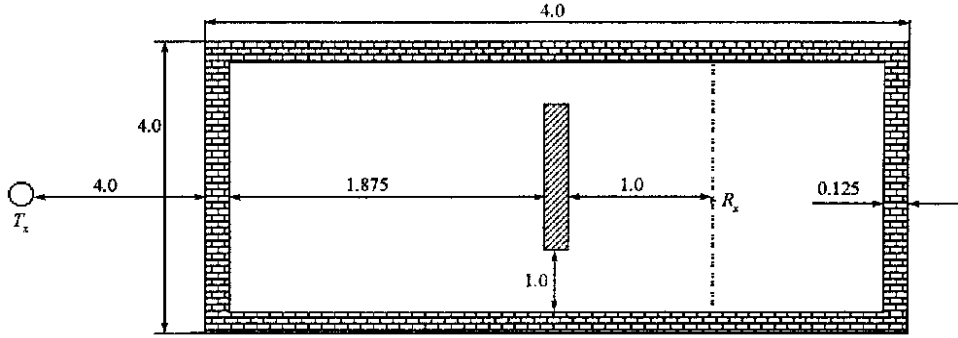


图 2 发射机处于室外

Fig. 2 The transmitter standing outdoor

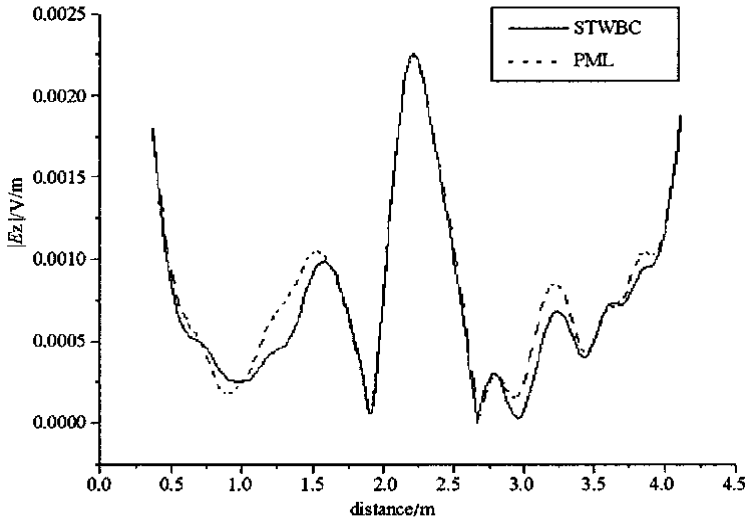


图 3 沿虚线纵向处电场强度分布

Fig. 3 The field strength distribution along the line

4 结论

将驻波一行波边界条件运用于 PSTD 方法之中, 从二维问题的计算实例可以看出, 虽然驻波一行波边界条件不能像 PML 一样吸收和衰减, 在精度上比 PML 条件稍差, 但它计算简单, 占用内存小, 计算速度快。这种新的结合方式在计算电大尺寸问题, 更能体现其优越性, 具有较好的实用性。

参考文献:

- [1] Liu Q H. The Pseudospectral Time-domain Algorithm for Acoustic Waves in Absorption Media[J]. IEEE Trans. Ultrasonic Ferroelectrics and Frequency Control, 1998, 45(4): 1044- 1054.
- [2] Liu Q H. PML and PSTD Algorithm for Arbitrary Lossy Anisotropic Media[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1999(2): 48 - 50.
- [3] 李清亮. 计算电大尺寸建筑物内电场场强的 PSTD 方法[J]. 通信学报, 2000(12).
- [4] 谭怀英, 梁甸农, 刘克成. FDTD 中的一种新截断边界——STWBC[J]. 电子学报, 2001(3).
- [5] 谭怀英, 尹家贤, 刘克成. 一种简化行波边界条件在 FDTD 中的实现[J]. 微波学报, 2001(1).
- [6] 谭怀英, 梁甸农, 刘克成. FDTD 中的一种新截断边界——STWBC[J]. 电波科学学报, 2001(1).