

战场电磁环境构建中的抛物方程应用研究

来嘉哲^{*①②③} 方广有^① 刘帅^③

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

^③(解放军装备学院 北京 101416)

摘要: 在进行战场电磁环境的数字化构建过程中, 需要结合各类环境要素对电波的传播过程进行建模和仿真。抛物方程(Parabolic Equation, PE)描述的模型适用于从视距到超视距区域计算电波的传播特性, 并有分步傅里叶法(Split-Step Fourier Transform, SSFT)对模型进行计算, 但该算法是基于步长迭代的方法, 不易并行化实现, 在计算大区域电磁传播时难以满足时间上的需求, 给战场电磁环境的快速构建带来困难。该文提出一种基于矩阵转置的并行计算方法, 构造2维矩阵并按行或列分发给不同的进程, 实现了算法的并行计算。该方法能够充分利用计算集群的运算能力, 降低了计算时间。计算机仿真结果表明并行算法相对于串行算法能达到4倍的加速比, 验证了该方法的有效性。

关键词: 战场电磁环境; 抛物方程; 分步傅里叶变换; 矩阵转置; 并行计算

中图分类号: TN97

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)01-0063-06

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20013

Research on Constructing War-field Electromagnetic Environment Using Parabolic Equation

Lai Jia-zhe^{①②③} Fang Guang-you^① Liu Shuai^③

^①(The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

^③(The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: Constructing digital war-field electromagnetic environment needs to model and simulate the transmitting course of electric waves combining various environment factors. The Parabolic Equation (PE) described model is suitable for computing the waveguide propagation characteristics from an area in the horizon to that over the horizon, and there is Split-Step Fourier Transform (SSFT) algorithm to resolve the model. But it is an iterative method based on step length and is difficult to be realized in parallels, thus it is difficult to meet the requirement time wise and bring the obstacles to constructing war-field electromagnetic environment fastly. This paper puts forward a parallel computing method based on matrix transposing, and realizes parallel computing of the algorithm by constructing two-dimensional matrixes and distributing them to different process in line or in row. The method makes full use of the operating ability of calculation clusters, decreasing computing time. The result of computer simulating shows that parallel algorithm can have a speedup as four times large as that of sequential algorithm, thus verifies the effectiveness of the method.

Key words: Electromagnetic environment; Parabolic Equation (PE); Split-Step Fourier Transform (SSFT); Matrix transpose; Parallel computing

1 引言

在信息化战争中, 复杂的战场电磁环境已经成为影响各类电子装备作战效能发挥的主要要素, 战场电磁环境的相关问题研究已成为战争仿真的热点。研究战场电磁环境的构建方法, 模拟出符合实

际战场中复杂的电磁环境态势, 对于推动电子装备的快速发展和作战仿真的应用具有重要的意义。

战场电磁环境的构建可以采用物理或数学的方法, 按照预先设置的场景生成电子战系统所面临的战场电磁环境, 模拟战场上的电子战行为。战场电磁环境的构建按具体的实现方式分为以下4种: 外场模拟、微波暗室仿真、注入式仿真和全数字仿真。前3种方式属于实物半实物仿真的范畴, 利用实际

的电子设备形成射频信号来模拟战场电磁信号,逼真性好,可用于电子装备的试验,但是受试验环境的影响和制约,难于体现出实际战场电磁环境要素的影响。而全数字仿真方法可以任意设置辐射源和环境要素,手段灵活,利用计算机可快速构建任意设置的战场电磁环境,便于系统的分析和设计。

战场电磁环境的数字化构建中,最主要的是能够计算出各类辐射源在实际传播要素影响下的传播过程,在可实用的电波传播模型中,能够快速准确地预测不规则地形与复杂大气条件下电波传播特性的方法是抛物方程(Parabolic Equation, PE)^[1]。与时域有限差分法、射线跟踪法等方法相比,抛物方程方法计算效率更高更精确,特别适合计算远距离电波场,得到了人们广泛关注。

国外较早开展了基于 PE 模型的电磁环境研究,如美国空间和海军作战系统中心开发的 AREPS^[2](Advanced Refractive Effects Prediction System),主要是基于抛物方程方法,可预测复杂环境下电波传播特性。由于最常用于求解 PE 模型的算法是一种步长迭进的方法,难于实现算法并行化,对于战场电磁环境的数字化快速构建造成了困难。

本文提出了一种基于并行计算机架构的数字化战场电磁环境构建方法,在输入各个辐射源参数、地形数据和大气参数的情况下,利用抛物方程模型计算电波传播的过程,得出整个区域的场分布,从而模拟出复杂的战场电磁环境。在计算的过程中,设计了并行算法来充分利用计算集群的运算能力,加速模型的实际求解过程。计算机仿真结果验证了该方法具有较好的性能,能满足大区域战场电磁环境的构建需求。文中第 2 节对抛物方程模型的基本原理和数值算法进行了介绍,通过与双射线模型比较,验证了该模型的正确性;第 3 节给出了并行算法的基本设计思路和实现流程;第 4 节给出了系统的运行流程和仿真计算结果,证明了并行算法的有效性;第 5 节给出了结论。

2 抛物方程模型

研究在直角坐标系 (x, y, z) 中电波的传播问题,假设电波只是在 2 维平面中 (x, z) 传播, x 为传播方向,电磁场的时谐因子为 $e^{-i\omega t}$, i 为复数单位, ω 为角频率,场量 ψ 在传播过程中满足以下 2 维标量方程^[3]

$$\partial_x^2 \psi + \partial_z^2 \psi + k^2 n^2 \psi = 0 \quad (1)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 为自由空间波数, λ 为波长, n 为传播介质的折射系数。对场量 ψ 做包络变换,可引入 x 轴方向的谐函数 $u(x, z) = e^{-ikx} \psi(x, z)$, 代入式(1)可得

$$\partial_x^2 u + 2ik\partial_x u + \partial_z^2 u + k^2(n^2 - 1)u = 0 \quad (2)$$

定义 $Q = \sqrt{k^{-2}\partial_z^2 + n^2}$, 对式(2)作因式分解后得出

$$[\partial_x + ik(1 - Q)][\partial_x + ik(1 + Q)]u = 0 \quad (3)$$

式(3)中的两个因式相互独立,分别代表了电波的前向和后向传播过程,在只考虑前向传播的情况下,式(4)已能很好的描述电波的传播过程:

$$\partial_x u = -ik(1 - Q)u \quad (4)$$

伪微分算子 Q 中包含了根式和二阶微分形式,在进行求解时无法得出简单的解析表达式,因此需要对算子作相应的近似处理。最常用的方法是采用 Taylor 近似法,利用 Taylor 展开的一阶近似表达式:

$$(1 + z)^{1/2} \approx 1 + 1/2z, \quad z \ll 1 \quad (5)$$

则 $Q \approx 1 + 1/2(k^{-2}\partial_z^2 + n^2 - 1)$, 代入式(4)后得到

$$\partial_x^2 u + 2ik\partial_x u + k^2(n^2 - 1)u = 0 \quad (6)$$

式(6)即为标准抛物方程(Standard Parabolic Equation, SPE),与式(2)所表示的椭圆方程相比,两式的主要差别在于标准抛物方程忽略了高阶偏微分项,即基于 $|\partial_x^2 u| \ll k|\partial_x u|$ 这一事实,忽略了 $\partial_x^2 u$ 项。SPE 的误差项主要是 Taylor 展开中忽略的二阶无穷小量 $O(z^2)$ 。以传播仰角为 α 的平面波为例,其谐函数表达式通常为 $u(x, z) = \exp[ikx(\cos\theta - 1) + ikz \sin\theta]$, 可得出 $\partial_x^2 u(x, z) = -k^2 \sin^2 \alpha \cdot u(x, z)$ 。因此忽略的二次项 $(k^{-2}\partial_x^2)^2 = \sin^4 \alpha$, 即整个方程的误差正比于 $\sin^4 \alpha$ 。在传播仰角为 10° 时误差项正比于 10^{-3} , 35° 时误差项正比于 10^{-1} , 可见 SPE 适合于传播仰角较小的场合,以目前的非接触作战模式为例,辐射源和目标的距离都在上百公里,能够满足 SPE 的传播仰角需求。

SPE 常用的求解方法是分步傅里叶法(Split-Step Fourier Transform, SSFT)^[4]。SSFT 是一种步进迭代的算法,其基本思路是在当前计算点将高度域变换成频率域,利用频率域的快速算法完成计算后变换回高度域,再向前逐步推进,从而计算出整个区域的场分布。该算法求解速度快,稳定性好,本文采用该方法完成战场电磁环境的构建。

SSFT 算法定义傅里叶变换对如下:

$$\begin{cases} \tilde{u}(x, p) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, z) e^{-ipz} dz \\ u(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{u}(x, p) e^{ipz} dp \end{cases} \quad (7)$$

简记 $\tilde{u}(x, p)$ 为 $\tilde{u}(x)$, 对 SPE 中的高度量 z 进行傅里叶变换,利用傅里叶变换的微分性质可得到

$$-p^2 \tilde{u}(x) + 2ik \frac{d\tilde{u}(x)}{dx} + k^2 (n^2 - 1) \tilde{u}(x) = 0 \quad (8)$$

对该微分方程求解, 可以得出

$$\tilde{u}(x + \Delta x) = e^{i(k/2)(n^2-1)\Delta x} e^{-(i/2k)p^2\Delta x} \tilde{u}(x) \quad (9)$$

上式的两个指数项分别代表了折射项和绕射项, 作傅里叶逆变换后可得出

$$u(x + \Delta x, z) = e^{\frac{ik(n^2-1)\Delta x}{2}} F^{-1} \left[e^{-\frac{ip^2\Delta x}{2k}} \tilde{u}(x) \right] \quad (10)$$

SSFT 算法的步进过程如图 1 所示。

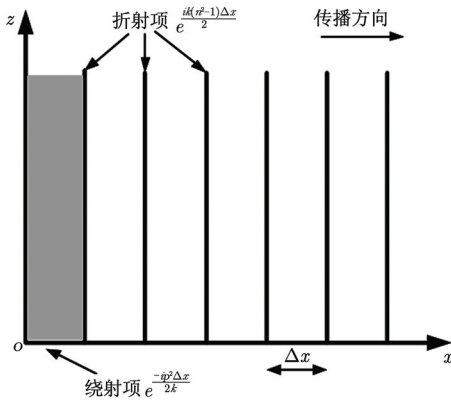


图 1 SSFT 算法示意图

实际的战场上受电磁环境影响最大的装备类型是雷达和通信装备, 所以战场电磁环境数字化构建过程中考虑的频率范围是 30 MHz~12.5 GHz。大气环境对电波传播的影响主要体现在式(10)中折射指数 n 的变化上, 实际环境中 n 的值会随高度和传播距离发生变换, 通常可以利用通用的折射率模型计算得出, 也可依据实际测量值输入。战场环境的地理覆盖范围较大, 其地理数据可通过 DEM 数字地图文件来获取, 并利用数据内插的方法构建出电波传播的地形剖面。实际的地表起伏不定, 可以采用移位变换地形模型来处理地表起伏^[5], 并结合阻抗边界条件, 采用离散混合傅里叶变换算法(Discrete Mixed Fourier Transform, DMFT)来解决边界条件^[6]。

PE 方程的推导和 SSFT 算法中都采取了一定的近似方法, 但其电波传播预测的影响程度很小。下文以双射线模型作为基准参考模型, 验证其正确性。双射线模型的传播因子理论值为

$$F = |1 + \Gamma e^{ik\Delta R}| \quad (11)$$

式中 ΔR 为直达波与反射波的程差, k 为自由空间波数, Γ 为地面的归一化反射系数, 取辐射源天线高度 20 m, 电磁波频率为 2 GHz, 地面介质导电率 $\sigma = 30 \text{ mS/m}$, $\epsilon_r = 5$, 接收点距发射天线距离为

10,000 m, 利用 SSFT 算法的计算结果和双射线模型的理论值对比如图 2 所示。

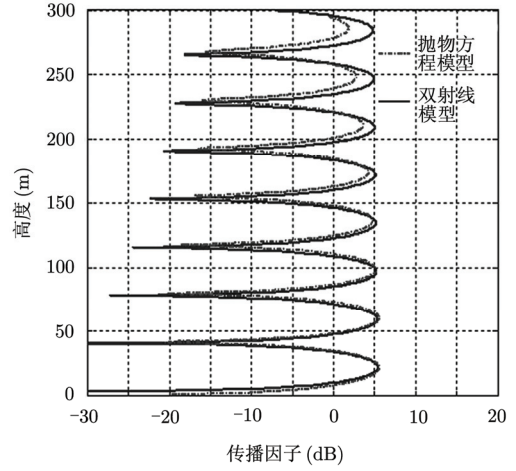


图 2 抛物方程与双射线模型结果比较

接收点的高度范围是从地表至 300 m, 图 2 显示了 2 种方法计算值的符合程度较高, 说明抛物方程模型和 SSFT 的精度能够满足战场电磁环境的构建需求, 所需要解决的问题就是在频率高、传播距离远的情况下如何快速完成传播过程的计算工作。在单台工作站计算能力有限的情况下, 可以利用高性能计算集群, 构建适合并行计算的传播算法, 提高算法中最为耗时的离散傅里叶变换(DFT)的计算速度, 加速 SSFT 的求解过程。

3 并行算法设计

为解决 SSFT 求解过程中 DFT 运算的耗时间题, 本文采用了矩阵转置的并行算法, 该算法的基本思想是: 将 1 维序列分解成较小规模的子数组, 构成 2 维矩阵, 继而对 2 维矩阵行、列分别计算 DFT^[7]。由于矩阵的各行之间、各列之间 DFT 计算是独立的, 便可以将 2 维矩阵按行或列分发给不同的进程, 实现数据并行计算。该算法可扩展性强, 将通信集中于一步内完成。

设 $N = N_1 \times N_2$, 记

$$\begin{cases} n = n_1 + N_1 n_2 \\ k = k_2 + N_2 k_1 \end{cases} \quad (12)$$

其中, $0 \leq n_1, k_1 < N_1, 0 \leq n_2, k_2 < N_2, N$ 表示高度方向采样的点数, N_1 表示 2 维矩阵的行数, N_2 表示 2 维矩阵的列数。并行算法启用了 P 个进程, 出于任务划分和通信问题的考虑, N_1, N_2 必须能够被进程数 P 整除。

并行计算 DFT 有如下 5 步:

- (1) 每个进程负责矩阵 $\mathbf{u}(n_1, n_2)$ 的 N_1/P 行, 并对每行做 N_2 点 DFT;
- (2) 对结果的每个元素乘以相应的旋转因子 $E_{n_1 n_2} = \exp(-2\pi j/N)n_1 n_2)$;
- (3) 将所得中间结果矩阵进行转置, 使其按列重新分配;
- (4) 每个进程负责矩阵的 N_2/P 列, 并对每列做 N_1 点 DFT;
- (5) 最后再次进行转置操作, 使矩阵元素在各进程的分布回到原矩阵的顺序。

在求解抛物方程的 SSFT 算法中, 需要大量的 DFT 计算, 本文基于矩阵转置的并行计算其核心是: 先不做 DFT 并行算法的第(5)步, 而是将绕射项指数转置, 直接与第(4)步所得结果相乘, 这样避免了第(5)步转置操作所带来的全局通信开销, 这样处理提高了并行计算效率。完成绕射项指数计算后, 按照(1)~(4)步相反的顺序做 IDFT 变换, 只是其中使用了旋转因子的共轭项 $E_{n_1 n_2}^* = \exp((2\pi j/N) \cdot n_1 n_2)$, 最后计算折射项^[8]。

仿真实现中并行算法流程如图 3 所示。

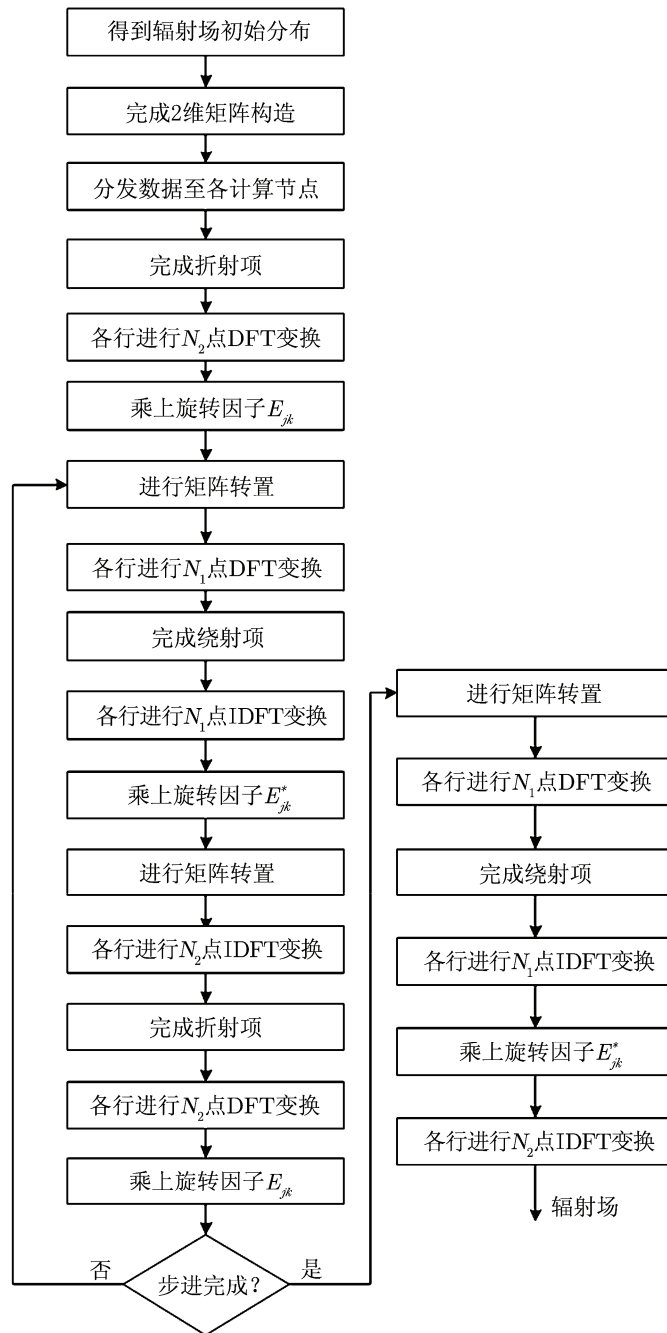


图 3 矩阵转置 SSFT 算法并行方案流程图

本方案中计算并行性主要体现在如下 3 方面:

(1) 由于折射项、绕射项的计算不依赖于输入序列, 可以在迭代开始前将其计算出来存储到各节点的本地存储器上;

(2) 各个进程分别计算出所有的旋转因子, 但计算时只取用该进程所对应的部分, 这样做同时简化了程序实现难度;

(3) 行、列变换在各进程内独立进行。

4 系统仿真结果

系统采用的集群系统是银河高性能计算集群, 计算单元包含 8 组×10 刀片式计算机, 系统峰值性能为 11.2512 TFlops。系统实现过程中使用 MPI 作为并行计算的消息传递接口, 它对并行算法的表达能力强, 性能高, 可移植性好, 已经成为并行编程事实上的标准。系统的运行流程如图 4 所示。

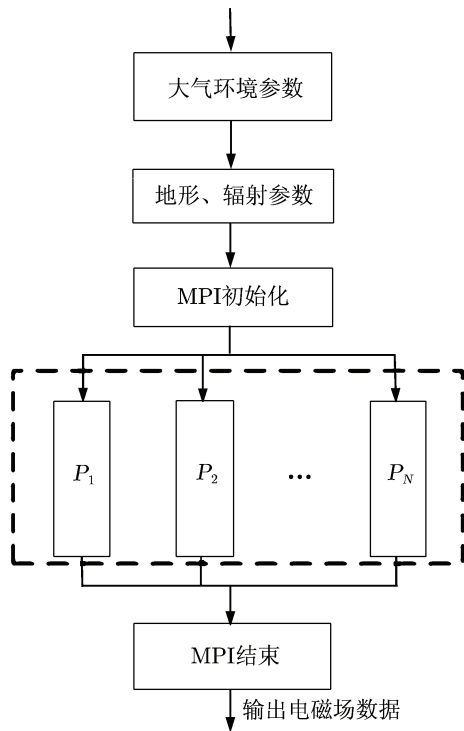


图 4 系统运行流程图

在完成大气环境、地形和辐射源等参数的输入之后, 系统进行 MPI 的初始化, 将任务分解到各个运算进程中去, 各个进程完成初步运算, 并利用 MPI 的通信机制进行数据交换, 完成并行算法中的矩阵转置, 并逐步向前推进, 完成整个区域的战场电磁环境构建。

以高度域上的离散点数为 2^{12} 个点, 推进步数

4000 步为例, 采用基于矩阵转置的 SSFT 整体优化并行算法对 SSFT 算法进行求解, 其中矩阵的行数和列数均取 64。在并行机上的测试结果如表 1 所示。

表 1 并行算法的加速比和效率(2¹²点)

节点数	计算时间 (s)	加速比	并行效率
1	3.01	1	1
2	2.28	1.32	0.66
4	1.48	2.03	0.51
8	1.01	2.98	0.37
16	0.78	3.88	0.24

若取高度域上离散点数为 2^{14} 点, 其余的条件不变, 在并行机上的测试结果如表 2 所示。

表 2 并行算法的加速比和效率(2¹⁴点)

节点数	计算时间 (s)	加速比	并行效率
1	11.24	1	1
2	8.12	1.38	0.69
4	5.23	2.14	0.54
8	3.61	3.11	0.39
16	2.54	4.43	0.28

图 5 为在不同的输入条件下系统的加速比曲线, 相比于单机上实现的串行算法, 利用并行机和并行算法, 速度可以提升 4 倍以上。同时仍然可以看出并行算法的加速比相对于理想的线性加速比还是存在着一定的差距, 主要的原因在于: 在使用矩阵转置的并行方法时, 每一步迭代过程都需要进行 2 次矩阵行和列的转置, 用于矩阵中各个元素的 DFT 和 IDFT 实现, 导致了算法的通信开销。但是相比于单纯的使用 FFTW 的 MPI 版本等现成软件的粗粒度并行方法, 其通信开销已经减少了近一半。

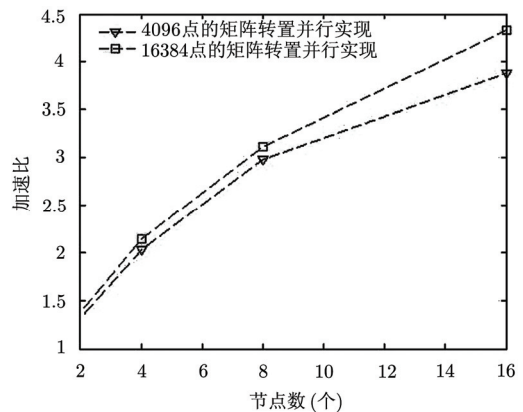


图 5 加速比曲线

从图 5 还可看出,随着高度域离散点数的增加,系统加速比有所增加,这说明并行算法中计算耗费的时间相对于通信时间的比例在增加。综上所述,随着用于战场电磁环境构建任务的计算节点的增加,运算速度在不断的增加,而且随着采样点数的增加,计算强度越来越大,系统的加速比也就越大,因此系统很适合在大区域战场电磁环境的数字化构建。

5 结 论

本文针对利用 PE 方程构建战场电磁环境过程中,对应的 SSFT 算法不易实现并行化的特点,提出了一种基于矩阵转置的并行实现方法。该方法将 1 维向量构造为 2 维矩阵,并按行或列分发给并行系统中的各个进程,在各进程中完成绕射项和折射项的计算,降低了并行计算的通信开销,提高了 SSFT 算法的并行效率。实验结果表明,该方法提高了系统的并行程度和计算速度,具有一定的实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] Donohue D J and Kuttler J R. Propagation modeling over terrain using the parabolic wave equation [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(2): 260-277.
- [2] User's Manual for Advanced Refractive Effects Prediction System Document Version 3.6. [EB/OL][2008-7-26]. <http://>

sunspot.spawar.navy.mil.

- [3] Levy M. Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation[M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 2000: 5-8.
- [4] Dockery G D. Modeling electromagnetic wave propagation in the troposphere using the parabolic equation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1988, 36(10): 1464-1470.
- [5] Barrios A E. A terrain parabolic equation model for propagation in the troposphere[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 42(1): 90-98.
- [6] Kuttler J R and Janaswamy R. Improved Fourier transform methods for solving the parabolic wave equation[J]. *Radio Science*, 2002, 37(2): 5.1-5.11.
- [7] Zoldi S, Ruban V, Zenchuk A, et al. Parallel implementation of the split-step Fourier method for solving nonlinear Schrödinger systems[J]. *Society for Industrial and Applied Mathematics News*, 1999, 32(1): 8-9.
- [8] 刘帅. 战场电磁环境快速构建关键技术研究[D]. [硕士学位论文], 装备学院, 2011: 64-69.
Liu Shuai. Research on key technology of quick constructing the battlefield electromagnetic environment [D]. [Master dissertation], The Academy of Equipment, 2011: 64-69.

作 者 简 介



来嘉哲(1976-),男,硕士,副研究员,研究方向为系统仿真和电磁环境构建。
E-mail: laijiazhe@163.com



刘 帅(1986-),男,博士生,研究方向为复杂电磁环境仿真。



方广有(1963-),男,研究员,研究方向为超宽带雷达成像理论与方法。