

学校编码: 10384
学号: 19820110154056

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

快速高精度正演算法在声波/弹性波逆时偏移中的应用

廈門大學

博 士 学 位 论 文

快速高精度正演算法在声波/弹性波逆时偏移中
的应用

Fast and High Accurate Algorithm and Its
Implementation for Acoustic waves and Elastic Waves
in Reverse Time Migration

谢剑刚

指导教师姓名: 柳清伙 教授

专业名称: 无线电物理

论文提交日期: 2017年4月

论文答辩时间: 2017年5月

学位授予日期: 2017年6月

答辩委员会主席: _____

评阅人: _____

2017年5月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()
课题(组)的研究成果,获得()
课题(组)经费或实验室的资助,在()
实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名): 谢剑刚

2017年5月22日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

() 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

() 2.不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人（签名）：谢剑刚

2017 年 5 月 22 日

摘要

逆时偏移技术 (Reverse time migration, RTM) 主要应用于解决地震成像问题, 是现行偏移方法中最精确的一种。逆时偏移成像的优势在于其成像过程是基于数值方法求解双程波动方程, 不仅没有角度限制, 还充分考虑了回转波、棱柱波、多次反射等复杂传播路径, 因此能够在高倾角、速度变化剧烈的复杂地下结构中得到高质量的图像。逆时偏移成像质量优于基于射线理论的 Kirchhoff 偏移或基于单程波动方程的其他偏移方法, 然而求解双程波动方程计算量大、计算需要的存储资源多, 导致逆时偏移成像计算成本较高, 这在一定程度上限制了其在工业应用中的推广。

缓解计算瓶颈可以从两个方面入手: 一方面使用快速、高精度算法求解波动方程, 以减少所需的计算资源; 另一方面采用更高效的硬件, 更优化的并行代码来提高逆时偏移的执行效率, 充分发挥硬件的性能。

逆时偏移成像的核心步骤之一是求解双程波动方程, 所以求解波动方程的效率很大程度上决定了整个逆时偏移的效率。本文中, 我们建议使用高阶有限差分方法 (Finite difference time domain method, FDTD) 和时域伪谱方法

(Pseudospectral time-domain method, PSTD) 来提高逆时偏移中方程数值求解的效率。传统逆时偏移成像中使用较多的二阶中心差分格式, 计算简单但存在采样率高、计算量大等问题, 求解效率不高。在空间采样上采用高阶差分格式, 能够有效降低空间采样率, 减少网格规模, 从而节省存储空间和计算时间。在三维空间中均使用有限差分方法进行计算, 在保证同样计算精度的前提下, 空间离散上用 12 阶差分格式代替 2 阶差分格式, 能够节省多达 96.3% 的存储空间和大量的计算时间。然而, 即使使用高阶差分方法, 逆时偏移所需的计算资源仍然过于庞大, 要进一步降低计算存储, 使用时域伪谱方法是一个有效手段。时域伪谱方法能够比高阶有限差分方法更进一步缩减所需的存储空间和计算时间。时域伪谱方法是传统伪谱方法与完美匹配层技术结合而成。伪谱方法利用快速傅里叶变换 (Fast Fourier transform, FFT) 求取空间导数, 由于奈奎斯特抽样定理 (Nyquist sampling theorem), 伪谱方法的空间采样密度仅需要每个最小波长 2 个采样点, 这仅为 2 阶差分格式的六分之一和 12 阶差分格式的二分之一。对一个三维问题,

在获得同样计算精度的前提下,伪谱方法需要的空间网格规模约为 2 阶差分格式的 0.5%, 且仅为 12 阶差分格式的 12.5%。然而, 由于傅里叶变换的隐含周期性约束引起的折叠效应和 Gibbs 效应, 传统伪谱方法具有的低采样、高精度优势只有在空间上具有周期性的问题上才能充分发挥作用, 这极大限制了伪谱方法的广泛应用。时域伪谱方法采用完美匹配层技术作为边界条件, 不仅能够截断物理计算区域, 并使边界处不产生反射, 还能够人为构造出周期性条件, 从而能够满足傅里叶变换的隐含周期性约束, 使得时域伪谱方法能够在复杂的非周期性问题中使用。

为了满足逆时偏移的庞大计算需求, 中央处理器集群 (CPU Cluster)、通用图形处理单元 (Graphics Processing Unit, GPU) 和现场可编程门阵列 (Field programming gate array, FPGA) 等硬件设备均在逆时偏移中得到不同层次的应用。在这些硬件中, 性能稳定、通用性好、编程难度适中的主要有中央处理器集群和图形处理单元。我们在逆时偏移中使用的高阶差分方法和时域伪谱方法也是适合并行加速的。本文中, 我们在中央处理器中使用 OpenMP 技术、在图形处理单元中基于 CUDA 平台对逆时偏移进行了并行加速, 并取得了良好的加速效果。采用高阶差分方法和时域伪谱方法, 与传统的二阶中心差分方法相比, 只需要较低的空间采样率就能达到同样的精度, 因此能够大量节省占用的存储空间, 这一点对于显存数量本就极为有限的图形处理单元尤其重要。采用我们建议的算法使得图形处理单元能够求解规模比原来大得多的问题, 计算效率也大幅度提升。文中我们还对时域伪谱方法在图形处理单元中的计算进行了优化。我们提出了一种结合了一维傅里叶变换和基于共享内存的高效矩阵转置的新方法来代替三维傅里叶变换, 使得图形处理单元中伪谱求导的效率提升了 30%。我们还采用了把实数序列傅里叶变换替换成复数序列傅里叶变换得到的一种新的合并伪谱求导算子, 使得伪谱求导的效率再次获得了提升, 计算时间平均减少了 20%。

本文中, 我们在多个 2D、3D 地震模型中应用了我们提出的逆时偏移方法, 并验证了其精确、快速、计算成本低等特点。

本论文的创新性在于: 针对逆时偏移成像的主要瓶颈, 本文一方面在逆时偏移成像中使用了快速高精度的高阶差分和时域伪谱方法, 大幅度减少了所需的计算资源, 促进了逆时偏移成像在工业中的应用; 另一方面使用多种加速技术对基

于高阶差分和时域伪谱方法的逆时偏移成像进行了并行加速,对加速的步骤和细节进行了优化,较大幅度提升了加速效果,从而提高了计算资源的使用效率。

关键词: 时域伪谱法, 高阶差分法, 逆时偏移成像

厦门大学博硕士论文摘要库

ABSTRACT

Reverse time migration (RTM) is a high-efficiency tools for seismic imaging. RTM has been considered to be one of the most accurate seismic pre-stack depth migration methods, especially for imaging geologically complex structures. RTM calculates the two-way wave equations numerically. It has no angle limit, and has considered complex propagating paths, such as turning, prismatic and multiple reflections. RTM can get better imaging quality than ray based Kirchhoff migration and one-way equation based migration methods. However, RTM is computationally expensive for mass computation and storage to solve the two-way wave equation numerically. The bottleneck limits the widely industrial application of new methods.

To ease the bottleneck, two ways can be considered. The one is using fast and accurate numerical method to solve the two-way wave equations, and thus reduce the amounts of the computation resource. The other is using high-performance hardware and optimized code to improve the efficiency of RTM.

The core procedure of RTM is solving the two-way equations. So an efficient numerical method to solve the equations accurately and fast is important to the efficiency of RTM. We propose to use the high-order finite difference time domain method (FDTD) and the pseudospectral time domain method (PSTD) to improve the the efficiency of RTM. Traditional RTM usually uses 2nd-order central difference schema. The 2nd-order central difference schema is easy to implement but has shortcoming of high sample rate and computationally intensive. Using a high-order difference schema in space can significant reduce the spatial sample rate and grid size, thus saves mass computation time and storage. In a 3D model, using 12th-order difference in space instead of 2nd-order difference can save up to 96.3% storage and mass computation time. However, the needed computation resource of RTM is still enormous even if we use the high-order difference. The PSTD method is an effective method to further reduce the requirements. Traditional pseudospectral method uses the fast Fourier transform (FFT) algorithm to calculate the spatial derivatives, but is limited by the wraparound effect due to the periodicity assumed in the FFT. The PSTD

algorithm combines the pseudospectral method with a perfectly matched layer (PML) for acoustic waves. PML is a highly effective absorbing boundary condition that can eliminate the wraparound effect. It enables a wide application of the pseudospectral method to complex models. RTM based on the PSTD algorithm has advantages in the computational efficiency compared to traditional methods such as the second-order and high order finite difference time-domain (FDTD) methods. The spatial sample rate of PSTD method is only 2 points per minimum wavelength at the highest frequency, which is only one sixth of the 2nd-order FDTD and half of the 12th-order FDTD. For a 3D model, in the same accuracy, the PSTD method needs a grid size which is only 0.5% of the 2nd-order FDTD and 12.5% of the 12th-order.

The computational requirements of RTM are enormous, to overcome this limitation, large scale CPU clusters (homogeneous hardware) have been commonly used for RTM. Besides, "heterogeneous" hardware can also be applied to RTM, such as the IBM Cell/BE processor, Field Programmable Gate Array (FPGA), and the Graphics Processing Unit (GPU). Among all platforms mentioned above, CPU and GPU have advances of stable performance, good universality and easily programming. We use OpenMP in CPU and CUDA in GPU to speedup the RTM based on the PSTD method and the high-order FDTD method. Our RTM based on on the PSTD method and the high-order FDTD method is suitable to parallel computing. RTM based on on the PSTD method and the high-order FDTD can significant reduce the grid size and it is important to a memory-limited GPU card. RTM based on the PSTD algorithm and the high-order FDTD method are particularly suitable for running on GPU because it can solve a much larger problem than the traditional FDTD method on a memory-limited GPU. To secure a better performance and generality of FFT in GPU, we present a scheme which combines 1D FFT with matrix transpositions instead of using 3D FFT directly, and get 30% performance improvement in pseudospectral derivative operator. The matrix transpositions use shared memory to improve memory access efficiency. We also apply an efficient FFT scheme proposed by Xu et al. which replaces even-sized R2C FFT with a half-sized C2C FFT, and get

further 20% performance improvement in pseudospectral derivative operator. For a small amount and balanced memory swapping from computer to GPU, we save the boundaries in lieu of checkpointing scheme when we propagate the source wavefield forward and backward. The proposed RTM has an acceleration ratio of about 80 times by a Tesla K20X GPU card on a desktop computer.

The simulation results of 2D and 3D models demonstrate that the proposed RTM is fast and inexpensive.

Keywords: Pseudospectral time-domain algorithm, high-order finite difference method, reverse time migration

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	IV
目 录	VII
Contents	X
第 1 章 绪论	1
1.1 逆时偏移成像及其发展.....	1
1.2 逆时偏移中的数值计算.....	4
1.2.1 数值仿真方法.....	4
1.2.2 并行加速.....	8
1.3 论文研究内容提纲及主要的创新点.....	12
第 2 章 声波、弹性波方程正演	14
2.1 数值仿真方法.....	14
2.1.1 时域有限差分方法.....	14
2.1.2 时域伪谱方法.....	16
2.2 声波方程正演.....	18
2.2.1 声波方程和数值离散.....	18
2.2.2 声波方程的完美匹配层.....	19
2.3 弹性波方程正演.....	22
2.3.1 弹性波方程和数值离散.....	22
2.3.2 弹性波方程的完美匹配层.....	25
2.4 震源的加载.....	28
2.4.1 震源的时间函数.....	28
2.4.2 震源平滑化.....	29
2.5 时间采样率和空间采样率.....	31

2.5.1	空间采样率	31
2.5.2	时间采样率	33
2.6	数值方法效率对比	35
2.7	本章小结	37
第 3 章	声波、弹性波逆时偏移	38
3.1	逆时偏移基础	38
3.1	成像条件	39
3.1.1	互相关成像条件	40
3.1.2	归一化互相关成像条件	40
3.1.3	时间区间约束互相关成像条件	40
3.2	边界保存与波场逆推	41
3.3	声波逆时偏移数值算例	44
3.3.1	常速度模型	44
3.3.2	不规则分层模型	47
3.3.3	Marmousi2 速度模型	50
3.3.4	SEG/EAGE 3D OverThrust 模型	57
3.3.5	SEG/EAGE 3D Salt 模型	62
3.4	弹性波逆时偏移数值算例	65
3.4.1	二维分层模型	65
3.4.2	Marmousi2 模型	68
3.4.3	三维分层模型	70
3.5	本章小结	72
第 4 章	逆时偏移并行加速	74
4.1	CPU 并行加速	75
4.1.1	OpenMP	75
4.1.2	使用 N 点复数傅里叶变换代替 2 个 N 点实数傅里叶变换 ..	75
4.1.3	CPU 亲和性	77
4.1.4	并行性能分析	78

4.2 GPU 并行加速	81
4.2.1 GPU 及 CUDA 简介	81
4.2.2 使用 1D FFT 代替 3D FFT	82
4.2.3 使用 N 点复数傅里叶变换代替 $2 \times N$ 点实数傅里叶变换	86
4.2.4 调整快速傅里叶变换的点数	88
4.2.5 并行性能分析	90
4.3 本章小结	92
第 5 章 结论和展望	94
参考文献	96
攻博期间取得的研究成果	107
致 谢	108

Contents

Chinese Abstract	I
English Abstract	IV
Chinese Contents	VII
English Contents	X
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Background of Reverse Time Migration	1
1.2 Numerical Modeling in Reverse Time Migration	4
1.2.1 Numerical Modeling Methods	4
1.2.2 Parallel Acceleration	8
1.3 Research Content and Innovation Points	12
Chapter 2 Forward Modeling of Acoustic Wave Equations and Elastic	
Wave Equations	14
2.1 Numerical Modeling Methods	14
2.1.1 The Finite Difference Time-domain Method	14
2.1.2 The Pseudospectral Time-Domain Algorithm	16
2.2 Forward Modeling of Acoustic Waves	18
2.2.1 Acoustic Wave Equations and Numerical Discretization	18
2.2.2 PML of Acoustic Wave Equations.....	19
2.3 Forward Modeling of Elastic Waves	22
2.3.1 Elastic Wave Equations and Numerical Discretization	22
2.3.2 PML of Elastic Wave Equations	25
2.4 Source	28
2.4.1 Time Function of Source	28
2.4.2 Spatially Smoothed Source	29

2.5 Sampling Rate of Time and Space	31
2.5.1 Spatial Sampling Rate.....	31
2.5.2 Temporal Sampling Rate	33
2.6 Efficiency Comparasion of Numerrical Modeling Methods.....	35
2.7 Summary	37

Chapter 3 Reverse Time migration of Acoustic Waves and Elastic waves

.....	38
3.1 Basic Theory of RTM	38
3.3.1 Cross-correlation Imaing Condition	40
3.3.2 Normalized Cross-Correlation Imaing Condition	40
3.3.3 Time-Gating Cross-correlation Imaing Condition	40
3.2 Saved Boundary and Backward Propagation of Wave Field	41
3.4 Numerical Examples of Acousitc RTM	44
3.4.1 Const Velocity Model	44
3.4.2 Irregular Layered Model.....	47
3.4.3 Marmousi2 Model	50
3.4.4 SEG/EAGE 3D OverThrust Model	57
3.4.5 SEG/EAGE 3D Salt Model	62
3.5 Nuerical Examples of Elastic RTM	65
3.5.1 Irregular 2D Layered Model	65
3.5.2 Marmousi2 Model	68
3.5.3 Irregular 3D Layered Model	70
3.6 Summary	72

Chapter 4 Acceleration of Reverse Time Migration **74**

4.1 Acceleration by CPU	75
4.1.1 OpenMP	75
4.1.2 Replace Two N Points Real FFT with One N Points Complex FFT	75

4.1.3 CPU Affinity	77
4.1.4 Acceleration Performance Analysis	78
4.2 Acceleration by GPU.....	81
4.2.1 GPU and CUDA	81
4.2.2 Replace 1D FFT with 3D FFT	82
4.2.3 Replace 2×N Points Real FFT with N Points Complex FFT	86
4.2.4 Optimizing FFT	88
4.2.5 Acceleration Performance Analysis.....	90
4.3 Summary	92
Chapter 5 Conclusions and Prospects	94
References	96
Research Achievements during Pursuing PhD Degree.....	107
Acknowledgements.....	108

第1章 绪论

石油、天然气为代表的化石能源是现代工业发展不可或缺的重要资源。中国地质条件复杂，油气开采难度较大。随着近年来对页岩气等资源的深入开发，对油气勘探、开采技术的升级换代需求也随之不断提升。

地震勘探被广泛应用于油气勘探领域，是最常规的勘探手段之一。它的原理是对由人工制造强烈的震动（一般是地下或水下的爆炸）产生的弹性波在介质中的传播时产生的反射波进行研究，从而确定地下深处的地质构造和油气储层位置。随着现代工业和人类活动对油气资源的需求不断增加，人类油气勘探活动在深度和广度上都不断提高。新的勘探所面对的环境越来越复杂，成本也随之不断升高。面对越来越复杂的勘探需求，能够对复杂储层结构成像的高精度地震成像方法越来越受到人们重视¹。

1.1 逆时偏移成像及其发展

逆时偏移(reverse time migration, RTM)方法近年在油气勘探领域备受关注，它是目前最高成像精度的地震波叠前深度偏移方法之一。与其他成像方法相比，逆时偏移成像方法具有成像精度高、适应性广等特点，尤其是在高倾角、水平速度变化大的复杂地质结构成像中具有明显的优势。世界各国的科研人员在逆时偏移成像应用的各个相关领域取得了很多重要的进展，使得逆时偏移技术得到越来越广泛的应用²。

逆时偏移的基本思想最早在 1978 年由 Hemon 提出³。随后，Baysal⁴，Whitmore⁵及 McMECHAN⁶分别提出了对逆时偏移思想的具体应用。近年来，逆时偏移成像的研究热点不断发展，从叠后偏移到叠前偏移，从主要处理 2D 成像到现在 3D 成像已经开始得到应用，从声波方程偏移到弹性波方程偏移，从各项同性介质到倾斜横向各向同性介质（tilted transversely isotropic media, TTI）和其他各向异性介质，取得了一系列的重要成果。Cerveny 讨论了各向异性介质中基于一阶和二阶声波方程的逆时偏移⁷。Alkhalifah 利用 P 波离散关系实现了 P 波传

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库