

Е. А. Гондюл¹, В. В. Лисица¹, К. Г. Гадильшин¹*

Подавление численной дисперсии в 3D данных до суммирования во временной области с применением искусственных нейронных сетей

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: GondyulEA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Представлен новый метод трехмерного сейсмического моделирования, сочетающий классический сеточный метод с искусственной нейронной сетью, уменьшающей численную дисперсию в синтетических сейсмограммах волновых полей, рассчитанных на грубой сетке. Численные эксперименты для сложной 3D-модели скорости надвига SEG/EAGE показали значительное сокращение времени вычислений, до 15 раз. Инновационный подход представляется многообещающим для распространения в обработке и моделировании сейсмических данных.

Ключевые слова: глубокое обучение, численная дисперсия, сейсмическое моделирование

Е. А. Гондюл¹, V. V. Lisitsa¹, K. G. Gadyshin¹*

Time-domain 3D NDM-net for post-processing the results of seismic modeling

¹ Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: GondyulEA@ipgg.sbras.ru

Abstract. A new method of three-dimensional seismic modeling is presented, combining the classical grid method with an artificial neural network that reduces the numerical dispersion in synthetic wave field seismograms calculated on a coarse grid. Numerical experiments for a complex 3D SEG/EAGE Overthrust velocity model showed a significant reduction in computation time, up to 15 times. The innovative approach appears promising for adoption in seismic data processing and modeling.

Keywords: deep learning, numerical dispersion, seismic modeling

Введение

Численное моделирование распространения сейсмических волн необходимо для оценки корректности сейсмической обработки и интерпретации сейсмических данных. С другой стороны, высокие вычислительные затраты, порядка десятка тысяч ядро-часов, препятствуют широкой доступности сейсмического моделирования как инструмента. Качество решения сеточными численными методами зависит от шага вычислительной сетки или от числа степеней свободы. В частности, для моделирования распространения сейсмической волны пространственный шаг сетки определяется частотой зондирующего сигнала.

При существующих способах уменьшения дискретизации численной сетки без потери в точности решения таких, как применение конечно-разностных схем

подавления дисперсии или высокоранговых конечно-разностных схем, увеличивается число операций с плавающей точкой на одну степень свободы [3, 4], а значит скорость исполнения алгоритма снижается.

Другой подход заключается в уменьшении размерности задачи путем уменьшения степени свободы или узлов сетки с последующей постобработкой сейсмических данных. Для обработки сложных и многомерных сейсмических данных применяется глубокое обучение: искусственные нейронные сети обучаются на наборах размеченных данных и выявляют закономерности, которые трудны для человеческой интерпретации.

Искусственная нейронная сеть NDM-net применяется к трехмерным сейсмическим данным для уменьшения численной дисперсии. Полный набор сейсмограмм быстро вычисляется на грубой сетке с низкой точностью для всех источников. Обучающий набор данных включает сейсмограммы, вычисленные с высокой точностью при допустимой дискретизации для нескольких источников. Искусственная нейронная сеть обучается отображать сейсмические данные с высокой численной дисперсией в качественные данные. На завершающем этапе нейронная сеть применяется для коррекции всего набора данных. В двумерном случае, таким образом, время вычислений сейсмограмм сокращается до семи раз для всей системы наблюдения [2]. Здесь подход с применением NDM-net обобщается на трехмерный случай и проверяется для трехмерной модели Overthrust SEG/EAGE.

Предварительные замечания

3D NDM-net обрабатывает сейсмические изображения с использованием архитектуры сверточной нейронной сети (CNN) и требует представительного набора данных для обучения. Для обучения NDM-net выбираются два множества сейсмограмм для построения отображения входных зашумленных сейсмограмм на их откорректированные версии со сниженной численной дисперсией. Для обучения используется небольшая часть сейсмических записей волнового поля, вычисленного на грубой сетке для всей системы наблюдения. Затем обученная NDM-net применяется ко всем зашумленным сейсмограммам для уменьшения численной дисперсии. Проверка точности в 3D сейсмическом моделировании основывается на оценке, которая зависит от выбора набора данных для обучения.

Для 3D сейсмических съемок на суше общепринято размещение профилей на расстоянии 100-300 м друг от друга и с интервалами 20-50 м между сейсмическими источниками в каждом профиле. Таким образом, численное моделирование волнового поля для характерной системы наблюдения включает запись 500 сейсмограмм на квадратный километр, или порядка 50 000 сейсмограмм для всей системы наблюдения, охватывающей 100 км². Вариация сейсмогеологической модели для смежных источников относительно невелика, а значит сейсмограммы для соседних приемников различаются слабо. Поэтому основная идея подхода с применением NDM-net заключается в вычислении полного набора сейсмограмм с использованием метода конечных разностей с дискретизацией, не превышающей 3 точки на минимальную длину волны, тогда вычисление выпол-

няется относительно быстро, но численная ошибка в полученных сейсмических данных неприемлемо высока.

В то же время небольшая часть сейсмограмм вычисляется на детальной сетке в 6-10 точек на длину волны. Выбор приемников для записи точных сейсмограмм произволен или осуществляется исходя из предварительного анализа всей выборки сейсмограмм, полученных для грубой дискретизации. Затем нейронная сеть обучается преобразовывать данные с высокой численной дисперсией в данные с низкой дисперсией. Обученная сеть используется для подавления численной дисперсии во всем наборе данных. Обычно длина записей сейсмограмм составляет 3-5 секунд с дискретизацией от 1 до 4 миллисекунд, а значит в выборке порядка 5 000 сейсмических записей.

В исследовании для преобразования 3D синтетической сейсмограммы из версии с высокой численной дисперсией в версию с низким искажением применяется глубокая нейронная сеть (DNN), названная сетью уменьшения численной дисперсии в 3D (3D NDM-net) (Рис. 1). Архитектура 3D NDM-net – модификация 3D U-net, полносвязная сверточная нейронная сеть, которая состоит из кодировщика и декодировщика. 3D NDM-net принимает на вход 3D сейсмические записи в тензорной форме и на выходе создает тензор – 3D синтетическую сейсмограмму с уменьшенной численной дисперсией. Секция кодировщика состоит из пяти блоков в каждом из которых растет размерность карт признаков [16, 32, 64, 128, 256], в секции декодировщика пять блоков с уменьшением размерности карт признаков для каждого блока [256, 128, 64, 32, 16].

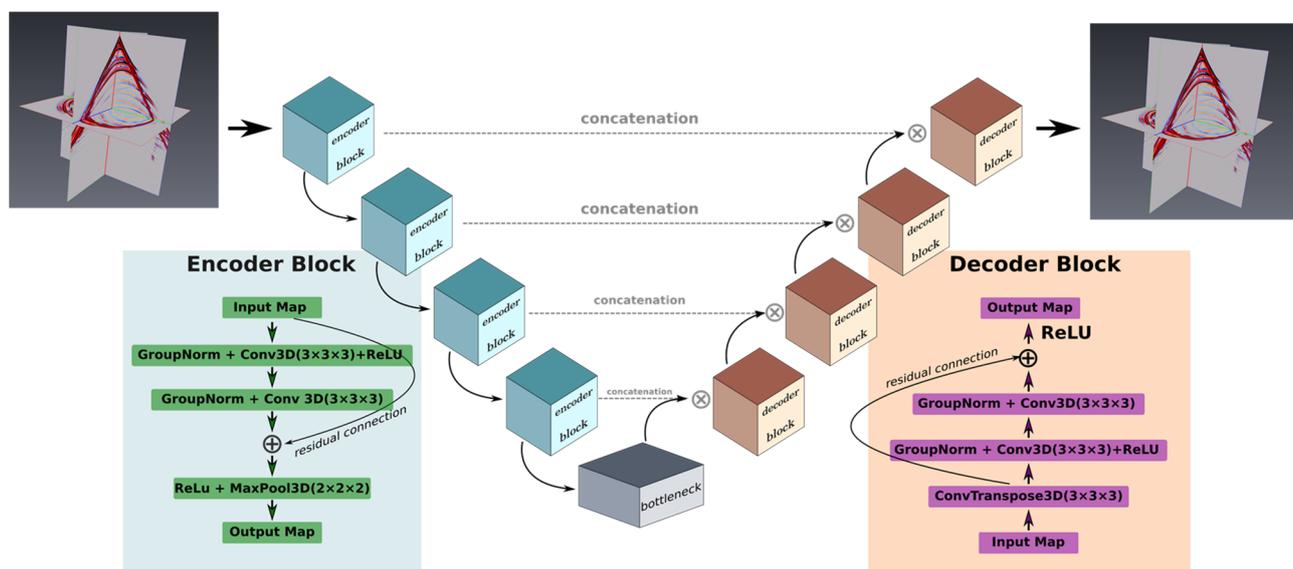


Рис. 1. Архитектура искусственной нейронной сети 3D NDM-NET (3D Residual U-net)

Скоростная геологическая модель SEG/EAGE Overthrust

Численные эксперименты выполняются для трехмерной акустической скоростной модели SEG/EAGE Overthrust (Рис. 2). Эта высокоточная модель отра-

жает подземные геологические структуры и соответствующие изменения акустической скорости. При помощи передовых вычислительных алгоритмов и методов построения сейсмического изображения модель обеспечивает точный анализ и качественную интерпретацию скорости и способствует подбору точных параметров и улучшению стратегий исследования месторождений в сложных геологических структурах. Благодаря многомерному отображению изменений скорости в подземных слоях модель служит ценным инструментом для геофизиков и инженеров, стремящихся оптимизировать добычу ресурсов и уменьшить риски проведения полевых исследований в зонах сдвига.

Геометрические размеры модели SEG/EAGE Overthrust – $20 \times 20 \times 4,6$ км с шагом сетки 25 м во всех направлениях. Синтетические сейсмограммы вычисляются с использованием импульса Рикера в качестве зондирующего сигнала с центральной частотой 20 Гц. Расчеты выполняются на сетках с шагами по пространству: 25 м для грубой сетки и 12,5 м для мелкой сетки. Система наблюдения состоит из 66 профилей, разнесенных на 150 м друг от друга, с интервалами между приемниками – 25 м и между источниками – 50 м на каждом профиле. Максимальный вынос источник-приемник вдоль линий источников и поперечных линий источников – 5 км.

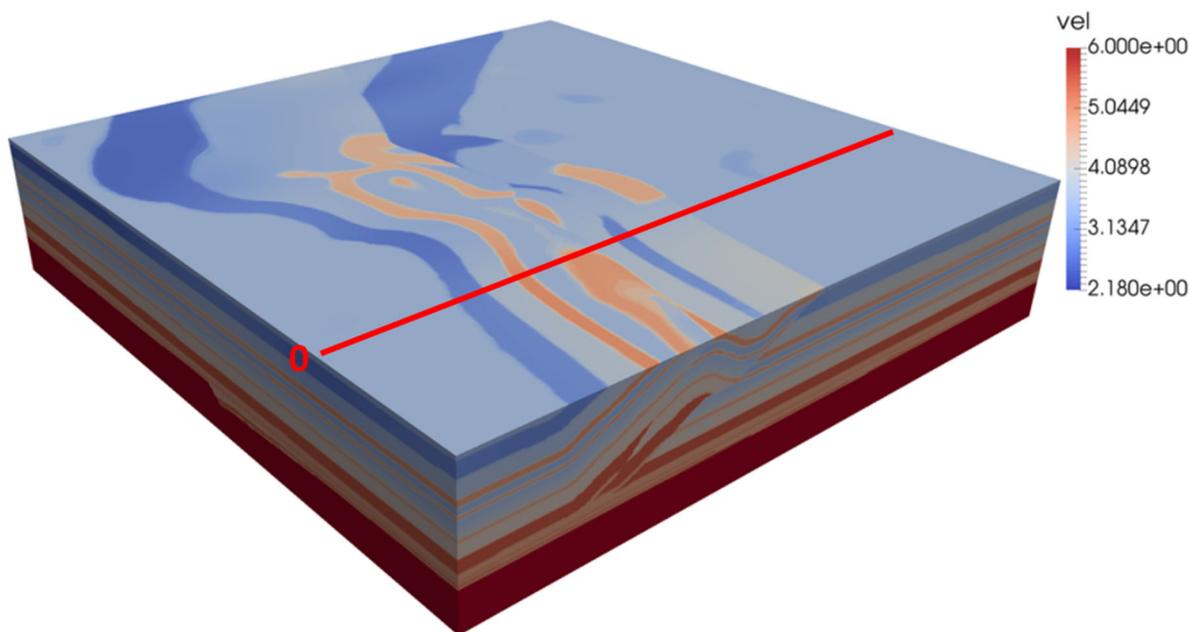


Рис. 2. Трехмерная скоростная модель надвига SEG/EAGE

Численные эксперименты

В ходе численного эксперимента выбирается профиль с индексом 0 и выполняется численное моделирование на мелкой сетке для каждого десятого сейсмического источника, таким образом, набирается равномерно распределенный набор данных для обучения, составляющий 10% от общего объема данных. Затем вычисляется полный набор трехмерных синтетических сейсмограмм для всех

200 источников на профиле. Обучение 3D NDM-net выполняется на ограниченном количестве сейсмограмм, а затем обученная искусственная нейронная сеть применяется для подавления численной дисперсии для всех сейсмограмм от всех источников на профиле (Рис. 3). Для оценки уровня численной дисперсии вычисляется относительная ошибка в L2-норме между решениями, полученными при вычислениях на мелкой и грубой сетках, или между решением с грубой сетки и соответствующей версией после обработки NDM-net, в процентах [1]. Численная дисперсия до применения 3D NDM-net превышает 50%. После обработки с помощью 3D NDM-net численная дисперсия снижается приблизительно до 20%. Для наглядности рассчитываются дисперсионные кривые для всего профиля в зависимости от индекса источника, показывающие значительное уменьшение уровня дисперсии в среднем.

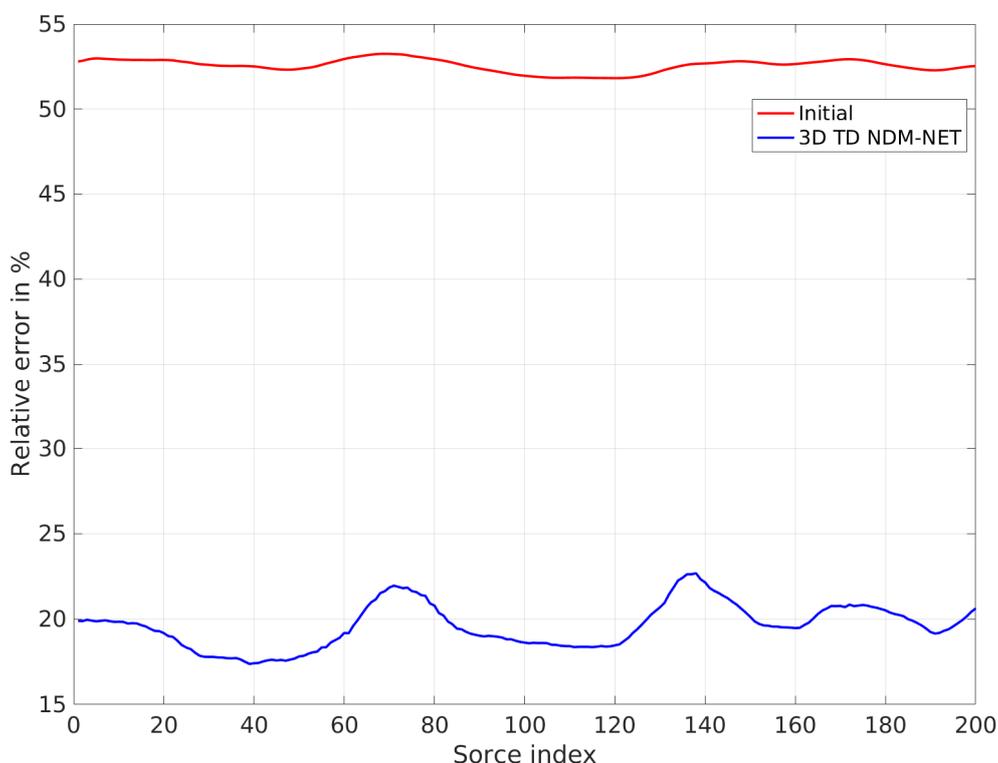


Рис. 3. График поведения численной дисперсии в зависимости от номера источника в линии до подавления (красным) и после (синим)

Вычисление волнового поля для одного сейсмического источника на грубой сетке занимает примерно 12 мин на процессоре Intel Xeon. Вычисление решения на точной сетке выполняется приблизительно за 195 мин на том же процессоре. Вычисление полного набора данных на грубой сетке занимает около 2600 ч, а на мелкой сетке – около 43000 ч. Обучение искусственной нейронной сети на 10% данных проходит за 4 ч на одном графическом процессоре NVidia A100 80Gb. Обученная 3D NDM-net обрабатывает одну сейсмическую запись около 1 мин и менее 220 ч – весь набор данных. С учетом времени вычисления волнового поля

на грубой сетке, обучения и обработки 3D NDM-net удалется ускорить процесс сейсмического моделирования приблизительно в 15 раз.

Заключение

Иновационный подход к 3D сейсмическому моделированию на основе комплексирования классического сеточного метода с постобработкой искусственной нейронной сетью эффективно снижает требования к вычислительным ресурсам без потери точности. Требования в вычислительных ресурсах для численного моделирования сейсмических данных на примере трехмерной системы сейсмического наблюдения суши, отвечающей современным требованиям, с применением описанного подхода сокращаются более чем в десять раз.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда грант № 22-11-00004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gadylshin K., Lisitsa V., Vishnevsky D., Gadylshina K. Hausdorff-distance-based training dataset construction for numerical dispersion mitigation neural network // *Computers and Geosciences*. – 2023. – Vol. 180. – P. 105438.
2. Gadylshin K., Vishnevsky D., Gadylshina K., Lisitsa V. Numerical dispersion mitigation neural network for seismic modeling // *Geophysics*. – 2022. – Vol. 87. – № 3. – P. T237-T249.
3. Lisitsa V. Dispersion analysis of discontinuous Galerkin method on triangular mesh for elastic wave equation // *Applied Mathematical Modelling*. – 2016. – Vol. 40. – № 7-8. – P. 5077-5095.
4. Virieux J., Calandra H., Plessix R. E. A review of the spectral, pseudo-spectral, finite-difference and finite-element modelling techniques for geophysical imaging // *Geophysical Prospecting*. – Vol. 59. – № 5. – P.794–813.

© *Е. А. Гондюл, В. В. Лисица, К. Г. Гадильшин, 2024*