



Квантовые вычисления: современное состояние технологии

Станислав Страупе

Центр квантовых технологий МГУ имени М.В.Ломоносова

Российский квантовый центр



Прогресс в области квантовых вычислений

C Quantum computers are getting more powerful

Number of qubits achieved by date and organization 1998 - 2020*





Source: MIT, Qubit Counter. *Rigetti quantum computer expected by late 2019.

CBINSIGHTS



Приложения квантовых алгоритмов



Универсальный квантовый компьютер



ПРИМЕНЕНИЕ

защищенные вычисления машинное обучение криптография квантовая химия наука о материалах глобальная оптимизация задачи сэмплинга квантовая динамика задачи поиска

УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ

полная, математически обоснованное ускорение

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ

очень высокая



NISQ устройство

ПРИМЕНЕНИЕ

квантовая химия наука о материалах глобальная оптимизация задачи сэмплинга квантовая динамика



УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ частичная

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ высокая?





Приложения квантовых алгоритмов



Универсальный квантовый компьютер



ПРИМЕНЕНИЕ

защищенные вычисления машинное обучение криптография квантовая химия наука о материалах глобальная оптимизация задачи сэмплинга квантовая динамика задачи поиска

УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ

полная, математически обоснованное ускорение

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ

очень высокая



NISQ устройство

ПРИМЕНЕНИЕ

квантовая химия наука о материалах глобальная оптимизация задачи сэмплинга квантовая динамика



УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ частичная

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ высокая?



Нет убедительной демонстрации преимущества квантовых компьютеров в практически важной задаче



Квантовое вычислительное превосходство





Supremacy regime

Процессор последнего поколения Google Sycamore способен решать задачи, недоступные классическим суперкомпьютерам

Однако эти рандомизированные алгоритмы **пока** не имеют практических приложений

Известные классы квантовых алгоритмов



- Факторизация чисел/ дискретный логарифм
- Линейная алгебра: матричные степени, линейные уравнения



- Ускорение переборных задач:
 - Поиск в базах данных
 - Поиск паттернов в строках
 - Ускорение в NP-сложных задачах
- Глобальная оптимизация (имитация отжига)



• Симуляция квантовых систем



Вычислительно сложные задачи





Превосходство в практически важных задачах

Вычислительное превосходство прогнозируется в задачах комбинаторной оптимизации



G.G. Guerreschi, A.Y. Matsuura. QAOA for Max-Cut requires hundreds of qubits for quantum speed-up. Scientic reports, 9, 6903 (2019).

Основные платформы для квантовых вычислений

Ионы/атомы в ловушках



Сверхпроводящие цепи



Оптические интегральные схемы



Квантовые точки/примесные атомы





Бенчмарки для квантовых процессоров

Квантовая схема из случайных перестановок и случайных двухкубитных гейтов

Зависимость квантового объёма от ошибки на гейт





Сверхпроводящие квантовые процессоры





- Процессоры до 128 кубитов
- Квантовый объём до 128
- Среднее фиделити гейтов*
 - 99% однокубитные
 - 98% двухкубитные

Google

- Процессоры до 53 кубитов
- Среднее фиделити гейтов
 - 99.85% однокубитные
 - 99.64% двухкубитные

IBM Q System One (Released)	(In development)		Next family of IBM Quantum	m systems
2019	2020	2021	2022	2023	and beyond
27 qubits Falcon	65 qubits Hummingbird	127 qubits Eagle	433 qubits <i>Osprey</i>	1,121 qubits <i>Condor</i>	Path to 1 million qubits and beyond <i>Large scale systems</i>



Сверхпроводящие квантовые процессоры

ibm_washington

Exploratory

Details

127	Status:	• Online	Avg. CNOT Error:	6.467e-2
Qubits	Total pending jobs:	137 jobs	Avg. Readout Error:	3.010e - 2
64	Processor type (j):	Eagle r1	Avg. T1:	97.24 us
QV	Version:	1.1.0	Avg. T2:	96.45 us
850	Basis gates:	CX, ID, RZ, SX, X	Supports Qiskit Runtime:	No

CLOPS



ibmq_kolkata Exploratory

Details

CLOPS

27	Status:	• Online	Avg. CNOT Error:	1.087e-2
ubits	Total pending jobs:	0 jobs	Avg. Readout Error:	1.320e-2
28	Processor type (j):	Falcon r5.11	Avg. T1:	127.13 us
v	Version:	1.9.15	Avg. T2:	94.8 us
2K	Basis gates:	CX, ID, RZ, SX, X	Supports Qiskit Runtime:	Yes





Ионные квантовые процессоры













- Полносвязный регистр из 11 кубитов
- 32 кубита тестирование
- Среднее фиделити гейтов
 - 99% однокубитные
 - 98% двухкубитные

Honeywell

- Полносвязный регистр из 10 кубитов
- QV = 1024
- Среднее фиделити гейтов
 - 99.99(1)% однокубитные
 - 99.72(6)% двухкубитные



Квантовые вычисления в ЦКТ МГУ



Направления исследований:

- Квантовые симуляторы и компьютеры на одиночных атомах в ловушках
- Линейно-оптические квантовые симуляторы и компьютеры
- Системное программное обеспечение для квантовых вычислительных систем



Атомная платформа квантовых вычислений





Направления исследований:

- Голографические ловушки для одиночных атомов рубидия
- Квантовые логические вентили с индивидуальной адресацией
- Двухкубитные вентили на основе диполь-дипольного взаимодействия ридберговских атомов
- Взаимодействие одиночных атомов с одиночными фотонами



Атомный квантовый регистр



Оптимальная сортировка венгерским алгоритмом ~20 мс для массива 6x6









Индивидуальная адресация кубитов



X gate

Hadamard gate



Преимущества атомной платформы

Масштабируемость массива

- Современный уровень ~ 100 атомов
- Перспектива ~10⁴ (мощность лазера ~ 10 Вт)
- С учётом потерь атомов ~ 2000 физических кубитов

Большие времена когерентности

- Время когерентности в микроловушке ~1 с
- Ошибки однокубитных вентилей < 10⁻⁴
- Ошибки двухкубитных вентилей < 3%

Высокая связность кубитов

- 2D и 3D массивы
- Связь не ограничена ближайшими соседями
- Все атомы внутри радиуса блокады могут быть запутаны за один такт
- Нативные многокубитные гейты





>100 атомов в прямоугольных массивах в группе Г.Биркля

D.Ohl de Mello et al. Phys. Rev. Lett. **122**, 203601 (2019)

Число дополнительных гейтов в случайных схемах в зависимости от связности

(получено с помощью компилятора Google Cirq)

L.Henriet et al. Pasqal Whitepaper, arXiv:2006.12326v1 (2020)



Оптические квантовые вычисления





Направления исследований:

- Программируемые многопортовые интерферометры
 - Фемтосекундная лазерная печать (SiO₂)
 - Литография (Si₃N₄)
- Однофотонные и многофотонные источники
 - Спонтанное параметрическое рассеяние
 - Полупроводниковые квантовые точки
- Архитектура линейно-оптических гейтов с повышенной эффективностью

Сотрудничество:

ФТИ им. Иоффе, МГТУ им. Н.Э.Баумана

Технологическая база



Программируемые интегральные интерферометры



Фемтосекундная лазерная печать

- Оптические потери менее 1 дБ/см
- Термооптические фазовращатели
- Время переключения 10 мс
- Ошибка приготовления 10⁻³ 10⁻²
- Продвинутые алгоритмы управления

SiN волноводы (совместно с МГТУ)

- Оптические потери менее 1 dB/cm
- Термооптические фазовращатели
- Компактные размеры
- Схемы большого масштаба

Последнее поколение чипов НОЦ ФНМ МГТУ:





Многофотонные источники





Однофотонный источник **ФТИ им. Иоффе**

На основе СПР

- До 6 фотонов
- Неразличимость 0.99
- Скорость генерации 6 фотонов~10 Гц

На квантовых точках

- Высокая яркость
- Неразличимость
- 10 канальный демультиплексор

Оптическая платформа для вариационных алгоритмов







- Число кубитов и качество логических операций в квантовых вычислителях стабильно растёт
- Квантовое вычислительное превосходство уже продемонстрировано
- Есть основания полагать, что даже небольшие NISQ устройства могут дать преимущество в практически важных задачах
- Квантовые алгоритмы и разработка квантовых процессоров активно развивающаяся область технологии
- Дорожная карта РФ по квантовым вычислениям призвана сократить отставание технологии в РФ и приблизить ее к мировым лидерам по всем платформам



Квантовые алгоритмы.

Современное состояние дел

М.Ю. Сайгин

Центр Квантовых Технологий & физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

16/02/2022

План



- Два подхода к построению квантовых компьютеров
- Алгоритмы с высоким требованием к числу кубитов и уровню ошибок
- Квантовое сэмплирование
- Алгоритмы для NISQ-устройств*

*Noisy Intermediate Scale Quantum devices

Два подхода квантовых вычислений



Цифровая гейтовая модель



Пример: гейтовая схема, реализующая квантовое преобразование Фурье – основной части алгоритма Шора.

Алгоритмы представляются в виде цепочек элементарных квантовых гейтов, как правило, 1- и 2-кубитовых. Например, алгоритм Шора и Гровера. Выполнение квантового алгоритма на квантовом вычислителе с гейтовой архитектурой сводится применению последовательностей однои двухкубитовых операций. Квантовые компьютер должен хорошо реализовывать отдельные элементарные гейты.

Аналоговая модель



конфигурация спинов (2 возможных конфигурации)

Пример: иллюстрация квантового поиска глобального минимума сложной функции.

Решаемая задача описывающий кодируется в гамильтониан, взаимодействие между частями квантовой системы. Конкретный (взаимодействие), задающий гамильтониан решаемую задачу реализуют на аналоговом квантовом вычислителе, например, квантовый выполняющем алгоритм квантового отжига ИЛИ вариационный алгоритм.



Цифровые квантовые алгоритмы

Алгоритм Шора

Алгоритм Шора сыграл большую роль в истории развития квантовых вычислений, т.к. изобретение этого алгоритма явно продемонстрировало потенциальную вычислительную мощность квантовых систем на примере практически важной задачи разложения чисел на простые множители. Вычислительная сложность разложения чисел на простые множители для классических компьютеров лежит в основе широко используемой системы шифрования RSA. Классические алгоритмы требуют экспоненциальное число операций $\exp(\Theta(n^{\frac{1}{3}}\log^{2/3} n))$ для разложения *n*-битных чисел, тогда как классические алгоритмы могут затрачивать полиномиальное число операций $O(n^2 \log n \cdot \log \log n)$.

Квантовые алгоритмы исправления ошибок

кодирование логических кубитов во множество физических в планарном поверхностном коде с дистанцией *d* (*Phys. Rev. A 86, № 3, 032324 (2012)*)



экспоненциальное снижение вероятности логической ошибки в зависимости от дистанции кода исправления ошибок *d* в режиме, когда вероятность ошибки *p* ниже порогового значения (*Phys. Rev. Lett. 120, № 5, 50505 (2018)*)



Зависимость числа кубитов в квантовом процессоре и затрачиваемого времени на разложение n-битных чисел RSA шифрования в квантовом компьютере с **многомодовой квантовой памятью**, предложенном в работе Phys. Rev. Lett. 127, № 14. Р. 140503 (2021)



Реализация алгоритма Шора для взлома RSA-шифров практически значимой длины *n* находится за пределами современного уровня развития технологий.

Квантовое сэмплирование



Интерференция на сбалансированном делителе

Сэмплинг фотонов в многоканальном интерферометре

MSU

Quantum

Technologies



Сложно рассчитывать на классическом компьютере

$$a_{\vec{S}} \sim perm(U_{\vec{R},\vec{S}})$$

S. Aaronson, A. Arkhipov "The computational complexity of linear optics", arxiv:1011.3245 (2010)





> 20 фотонов, интерферометр с 60 модами

Размерность гильбертова пространства 10¹⁴~2⁴⁸

H. Wang et al., Phys. Rev. Lett. 123, 250503 (2019)

Сэмплинг фотонов гауссовых состояний

66 66666666

26666666666

Размерность гильбертова пространства ~1030

H.-S. Zhong et al., Quantum computational advantage using photons // Science 370, 6523, 1460 (2020)





демонстрация квантового превосходства на сверхпроводниковом 53-кубитовом процессоре Sycamore корпорации Google

F. Arute et al. "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor" // Nature 574, p. 505-510 (2019)

Алгоритмы для NISQ-устройств*

*Noisy Intermediate Scale Quantum devices – квантовые вычислители среднего масштаба (~100 – 1000 кубитов) с шумами и ошибками

Квантовый отжиг



Адиабатическая эволюция гамильтониана

$$\widehat{H}(x) = (1-x)\widehat{H}_0 + x\widehat{H}_P$$
 ($0 \le x(t) \le 1$)
начальный гамильтониан
(проще приготовить собственное состояние) (ответ – в собственном состоянии \widehat{H}_P)

$$\widehat{H}_{0}|\Psi_{0}\rangle = E_{0}|\Psi_{0}\rangle, \widehat{H}_{P}|\Psi_{P}\rangle = E_{P}|\Psi_{P}\rangle$$

Обычно:

$$\widehat{H}_0 = \sum_i \widehat{\sigma}_x^{(i)} \Longrightarrow |\Psi_0\rangle = |+\rangle^{\otimes n} \qquad \qquad \widehat{H}_P = \sum_{i,k} J_{jk} \widehat{\sigma}_z^{(j)} \widehat{\sigma}_z^{(k)}$$

При медленном (адиабатическом) изменении x(t) система приготавливается в



Вычислители D-Wave

Пример топологии связанности кубитов в процессоре D-Wave





Пример решения задачи сейсмической инверсии: процессоры до 5000 кубитов* A.M. Souza et al. "An application of quantum annealing computing to seismic inversion"// arxiv:2005.02846v4 (2022)

*https://www.dwavesys.com/solutions-and-products/systems/



Задача MaxCut (задача о максимальном разрезе графа):

Найти подмножество *S* вершин графа *G=(V,E)*, такое,

что число рёбер между *S* и *V\S* максимально.





NP-сложная задача даже для поиска приближённого решения

Практическая польза:

- распознавание образов
- проектирование электронных устройств
- задачи планирования
- нахождение энергии основных состояний изинговских гамильтонианов



Оптимизация квадратичных функций (QUBO)

Задачи, сводящиеся к поиску минимума квадратичных функций (QUBO):

 $f(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{q}^T Q \; \boldsymbol{q}$

Q – матрица, кодильницая решаемую задачу, $q^{T} = (q_1, ..., q_n) -$ строка бинарных переменных ($q \in \{0,1\}^n$)

Множество задач можно свести к QUBO, например, прокладка оптимального маршрута транспорта и поиск геометрии *

* https://blog.xa0.de/post/List-of-QUBO-formulations/

Конкуренты квантового отжига, решающие QUBO





эффективные классические алгоритмы



до ~ 100 тыс. спинов

до 1 млн. спинов

T. Honjo et al, Science 7, No 40, abh0952 (2021) H. Goto et al, Science 5, No 4, aav2372 (2019) https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/ai-iot/sbm.html

Гибридные квантовые алгоритмы. Вариационный квантовый алгоритм (VQE)



Поиск глобального минимума:

MSU

Ouantum

Technologies

$$E(\vec{\theta}) = \frac{\left\langle \Psi(\vec{\theta}) \middle| \widehat{H} \middle| \Psi(\vec{\theta}) \right\rangle}{\left\langle \Psi(\vec{\theta}) \middle| \Psi(\vec{\theta}) \right\rangle} \ge E_0,$$

Приготавливаемое состояние (ansatz):

 $\left|\Psi(\vec{\theta})\right\rangle = U(\vec{\theta}) \left|\Psi_{0}\right\rangle$

 \widehat{H} - гамильтониан моделируемой системы

Квантовое химическое моделирование



Гамильтониан молекулы:

 $\widehat{H} = \sum_{n}^{N} h_{pq} \widehat{a}_{p}^{\dagger} \widehat{a}_{q} + \frac{1}{2} \sum_{n}^{N} h_{pqrs} \widehat{a}_{p}^{\dagger} \widehat{a}_{q}^{\dagger} \widehat{a}_{r} \widehat{a}_{s} = \sum_{n} g_{\alpha} \widehat{H}_{\alpha}$ h_{pq} , h_{pqrs} - предварительно рассчитываются на классическом компьютере $\langle \hat{a}_p^+ \hat{a}_q \rangle$, $\langle \hat{a}_p^+ \hat{a}_q^+ \hat{a}_r \hat{a}_s \rangle$ - рассчитывают на квантовом компьютере квантовый классический процессор компьютер $\boldsymbol{\theta}_{j+1} = \boldsymbol{\theta}_j + \delta \boldsymbol{\theta}_j$ Приготавливаем: $\left|\psi(\vec{\theta})\right\rangle = \widehat{U}(\vec{\theta})|\psi_0\rangle$ Находим минимум: $E(\vec{\theta}) = \sum_i h_j \left\langle\psi(\vec{\theta})\right|\prod_i \hat{Z}_i^j \left|\psi(\vec{\theta})\right\rangle$

Пример реализации VQE





Схема квантовой цепочки

F. Arute et al, Science 369, No 6507, abb9811 (2020)



Перепутывающий многокубитовый гейт: $V_m = \exp igl(-i \gamma_m \widehat{H}igr)$

Гамильтониан задачи:
$$\widehat{H} = -\sum_{i,j \in G} J_{ij} \widehat{Z}_i \widehat{Z}_j$$

Варьируемые параметры: $\vec{\beta}, \vec{\gamma}$ Изм

$$U_m = \exp\left(-i\beta_m \sum_{j=1}^N \hat{X}_j\right)$$

меряемое состояние: $\left|\vec{\beta},\vec{\gamma}\right\rangle = U_p V_p \cdot \ldots \cdot U_1 V_1 |+\rangle^{\otimes N}$

Алгоритм приближённой аппроксимации (QAOA)

Находим глобальный минимум функции:

$$E(\vec{\beta},\vec{\gamma}) = \left\langle \vec{\beta},\vec{\gamma} \right| \widehat{H} \left| \vec{\beta},\vec{\gamma} \right\rangle$$

Гамильтониан: $\widehat{H} = -\sum_{i,j \in G} J_{ij} \widehat{Z}_i \widehat{Z}_j$

царина и сарантии, что р~ехр(N)
Типично число слоёв р ~ log N

Реализация на 23 кубитах процессора Sycamore: *M.P. Harrigan et al., Nature 17, 332 (2021)*



граф задачи J_{ij}

MSU

Квантовое преимущество QAOA



MSU

Quantum

Centre

Technologies

Сравнение времени выполнения квантового алгоритма QAOA и классического алгоритма AKMAXSAT. (*G.G. Guerreschi, A.Y. Matsuura, Sci. Reps. 9, 6903 (2019)*)

Для достижения квантового преимущества необходимо $\sim \! 1000$ кубитов



Спасибо за внимание



Задача инверсии сейсмических данных

16/02/2022

Эпов К.А.

Получение сейсмических данных



- Глубина залегания целевых пластов: 1-4 км
- Частотный состав регистрируемых сигналов отраженных волн:~ 10-100 Гц
- 2D съемки наблюдения ведутся вдоль профилей
- 3D съемки густая площадная сеть источников и пунктов регистрации

Прямая и обратная задачи геофизики



Инверсия, прогноз свойств

1970-е годы: первые попытки инверсии для решения производственных задач нефтяной индустрии



FIG. 16. Synthetic logs show that the unconformity lies deeper in the section than the level usually mapped on the conventional seismic section of Figure 15 and provide detail of the facies which subcrop at the unconformity.

R.O. Lindseth Syntetic sonic logs – a process for stratigraphic interpretation Geophysics, Vol 44 No. 1, 1979

Свёрточная модель сейсмической трассы

$$S(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} W(\tau) \cdot R(t-\tau) d\tau + n(t)$$

W(\cdot) - сейсмическ ий импульс
R(\cdot) - импульсная реакция среды
n(\cdot) - помехи

Скорость Р-волн Коэф.отражения Сейсмический сигнал

Акустическое приближение, малые контрасты:

$$R(t) = \frac{1}{2}\frac{d}{dt}(\ln(I(t)))$$

Ограниченность рабочего диапазона частот зондирующего импульса W() приводит к потере информации о геологической среде

Сейсмическая инверсия – обратная задача



Задача деконволюции <u>некорректна</u> из-за ограниченности сейсмической полосы частот Операция интегрирования определена с точностью до произвольной константы (ln(l₀)). Т.е. <u>решение неединственно</u>.

Ошибки, полученные в результате деконволюции и при интегрировании могут накапливаться (особенно на низких частотах).

Т.е. решение неустойчиво.

Акустическое приближение, малые контрасты:

$$R(t) = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (\ln(I(t)))$$
$$\ln(I(t)) = \ln(I(0)) + 2 \int_{0}^{t} r(\tau) d\tau$$
$$I(t) = I_{0} \cdot e^{2 \int_{0}^{t} r(\tau) d\tau}$$

$$S(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} W(\tau) \cdot R(t-\tau) d\tau + n(t)$$
$$R(j\omega) = \frac{S(j\omega)}{W(j\omega)} + \frac{n(j\omega)}{W(j\omega)}$$

Неустойчивость рекурсивной инверсии





2 варианта импульсной трассы отличаются друг от друга менее чем на 5%





Малые отличия коэффициентов отражения $\{r_i\}$ приводят к большим отличиям в акустических импедансах $\{I_i\}$

Сейсмическая инверсия: привлечение априорной информации

Амплитудный спектр



Сейсмическая инверсия: постановка задачи

$$\sigma_{post}(m) = c \cdot \rho_{prior}(m) \cdot \rho_{data}(d_{obs} - g(m))$$

- т вектор упругих параметров, описывающий модель,
- d_{obs} вектор наблюденных сейсмических данных;
- g(m) результат расчета сейсмических данных для модели среды т;
- *р*_{prior}(m) априорная вероятность модели m;
- *р*_{data}(d_{obs}-g(m)) функция правдоподобия модели (вероятность получения данных d_{obs} при модели m)

Байесовский формализм:

ищется модель среды, удовлетворяющая априорным представлениям и измеренным данным

При определенных условиях эта задача может быть сведена к задаче оптимизации:

$$J = \left\| d_{obs} - g(m) \right\|^2 + \alpha \cdot \left\| m - m_{prior} \right\|^2 \to \min$$

Необходимость априорной модели

Задача инверсии (как и все обратные задачи геофизики) относится к классу **некорректных задач.** Для ее решения необходимо использовать ряд дополнительных ограничений.

Априорная модель: набор ограничений на возможные решения задачи, обусловленных геологическими представлениями и любой дополнительной сторонней информацией, напрямую не связанной с инвертируемыми геофизическими данными.

Сейсмическая инверсия: два семейства алгоритмов

Подходы к поиску решения

«Детерминистические»

Оптимизационная задача:

Ищется единственное решение, доставляющее минимум целевому функционалу

 $J = \left\| d_{obs} - g(m) \right\|^2 + \alpha \cdot \left\| m - m_{prior} \right\|^2 \to \min$

Как правило, применяются методы локальной оптимизации

достоинства	недостатки
Быстрое время счета	 Локальные минимумы; Сложность оценки неопределенностей; Сложность учета априорной геологической информации;

«стохастические»

Стохастическое моделирование:

Ищется семейство решений, не противоречащих сейсмическим данным и удовлетворяющее априорным ограничениям.

Moryт применяться как методы глобальной оптимизации (Simulated Annealing), так и методы стохастического моделирования (SGS, MCMC)

$$J = \|d_{obs} - g(m)\|^2 + \alpha \cdot \|m - m_{prior}\|^2 \to \min$$
$$\sigma_{post}(m) = c \cdot \rho_{prior}(m) \cdot \rho_{data}(d_{obs} - g(m))$$

достоинства	недостатки
 Глобальная оптимизация (+ оценка PDF – прямая оценка неопределенностей); Возможность прямого учета априорной геологической информации 	 Требовательны к ресурсам

Стохастическая инверсия – первые алгоритмы на базе SGS (Haas-Dubrule, 1994)

Assume that acoustic impedance logs are measured at n well locations within a large-enough depth window z_1 to z_2 surrounding the reservoir. Construction of a simulation comprises the six steps (Fig. 1) listed below.

1 Random drawing of a location (x,y) from the map of seismic traces.

2 Impedance is simulated along vertical traces: V(x,y,z) for $z = z_1$ to z_2 , conditionally to well data: $V(x_i,y_i,z)$ for i=1 to n and $z = z_1$ to z_2 , using a gaussian sequential geostatistical algorithm.

3 Seismic modelling: conversion of depth into time and transformation of impedance to seismic amplitude S by convolving the reflectivity R with the seismic wavelet O:

$$R(x, y, t) = \frac{1}{2} \frac{\partial \text{Log} V}{\partial t}; S(x, y, t) = R(x, y, t) * O(t).$$

4 Comparison of the simulated trace S_{sim} with the measured trace S_{dat} . The criterion chosen may be the linear correlation coefficient or the mean square deviation. If the comparison is not considered satisfactory, another trace simulation is performed at the same location (return to point 2).

5 The geological column retained is merged with the data and considered as a further well $(n \rightarrow n+1)$.

6 Random drawing of another location (x,y); the process is iterated from step 1 until all the different locations have been processed following a 2D random path.

Drawing of a point (x,y)

Стохастическая инверсия – первые алгоритмы на базе SGS (Haas-Dubrule, 1994)

Fig. 7. Line 33. Simulated impedances: (a) nls = 1, (b) nls = 10, (c) nls = 100. Simulated and measured amplitudes: (a') nls = 1, (b') nls = 10, (c') nls = 100, (d) real section.

Разрешенность рез-та инверсии совпадает с разрешенностью SGS

Haas, Dubrule, 1994

Стохастическая инверсия: современные подходы (Saussus, Sams, 2014)

Denis Saussus1* and Mark Sams2,3

Стохастическая инверсия:

практические сложности классического подхода

Типичные размеры модели:

Площадь: 10x10 км Толщина целевого интервала: 100 м Горизонтальные размеры сетки: 25x25 м Шаг сетки по вертикали: 1 м Количество узлов: 16 млн

Типичные объемы данных:

- 800 тыс. сейсмических трасс (5 частичных угловых сумм для площади 100 кв. км)
- 300 мс целевое окно для анализа (частота дискретизации 2мс 150 отсчетов на трассу)
- Объем массива данных для инверсии ~ 1 ТБ (точность double)

Перебираемые параметры для каждого узла:

- Тип горных пород (фации, литотипы) дискретные значения.
- Упругие параметры (2 упругих модуля, плотность) 3 непрерывных переменных.
- Инженерные параметры (пористость, глинистость, проницаемость) набор непрерывных переменных, напрямую не влияющих на сейсмические данные, но использующихся в априорных данных.

Размерность пр-ва решений типичной задачи инверсии: ~ 10⁷-10⁸

- Большой объем перебираемых вариантов и численных решений прямой задачи
- Сложный «рельеф» целевой функции (локальные минимумы) необходимость глобальной оптимизации

Вычислительные системы, работающие по принципу «квантового отжига», представляются перспективными для решения подобных практических задач

Возможная архитектура системы

Пример элементарной подзадачи: Трехслойная модель, акустический случай

АІ_і — акустический импеданс (скорость*плотность) в j-м слое

Модель описывается **5 параметрами** (времена t₁, t₂ и значения акустического импеданса для каждого из 3-х слоев).

<u>Дано</u>:

S(t)

 $S(t) = \int W(\tau) \cdot R(t-\tau) d\tau + n(t)$

 $W(\cdot)$ - сейсмический импульс $R(\cdot)$ - импульсная реакция среды

n(·) - помехи

Alo

Al₁

 AI_2

t₁

 t_2

Two-way time (ms)

- Зондирующий импульс W(t)
- Априорные распределения величин $\{t1, t2\}, AI_1, AI_2, AI_3$
- Сейсмическая трасса S(t)

<u>Найти</u>:

 Сэмплированные совместные апостериорные распределения величин {t1, t2, AI₁, AI₂, AI₃} (либо наиболее правдоподобную модель).

> Величины AI_1 , AI_2 , AI_3 - строго положительные, независимые . На времена накладывается ограничение: $0 < t_1 < t_2$.

Трехслойная модель, акустический случай

Заключение

- Задача сейсмической инверсии некорректна.
- Практические подходы основаны на привлечении сторонней информации.
- Современные тенденции использование подходов стохастического моделирования.
- Стохастическая инверсия: большая размерность задачи, необходимость глобальной оптимизации
- Перспективы применения квантовых вычислений могут быть связаны с разбиением основной задачи сейсмической инверсии на «элементарные» подзадачи.