

Роман С. Белоусов

Аннотация

В работе предлагается развитие парадигмы Нейровесовых Полей (NWF), в которой семантическое представление данных интерпретируется не как статический заряд с фиксированной ковариацией, а как волновая функция в гильбертовом пространстве смыслов. Показано, что переход к волновому представлению позволяет описывать данные в режиме суперпозиции, а локализованный заряд (ядро и ковариация) возникает только как результат коллапса волновой функции при запросе. Формализован математический аппарат, включающий эволюцию волновых пакетов, интерференцию, коллапс и контекстно-зависимую суперпозицию. Проведён сравнительный анализ с исходной NWF, векторными базами данных, гиперразмерными вычислениями (HDC) и квантовыми моделями памяти. Предложенный подход позволяет снизить вычислительную сложность хранения и обработки за счёт отказа от постоянной локализации объектов, открывает возможность использования квантовых алгоритмов и даёт более естественную интерпретацию неопределённости и семантического взаимодействия.

1. Введение

Парадигма Нейровесовых Полей (NWF) ввела фундаментальное изменение в представлении данных: каждый объект кодируется не вектором, а байесовской моделью, описываемой точечной оценкой параметров θ_i и

ковариацией Σ_i , что позволяет хранить данные в сжатом виде, учитывать неопределённость и строить семантическое поле как суперпозицию потенциалов $\phi_i(r)$. Однако в исходной NWF каждое представление статично: ядро z_i и ковариация Σ_i хранятся явно, а суперпозиция полей вычисляется для всех объектов всегда. Это приводит к двум основным ограничениям:

1. Вычислительная нагрузка. Для N объектов в D -мерном пространстве суперпозиция требует $O(N)$ операций при каждом обращении к полю, что при больших N становится непрактичным.
2. Избыточность локализации. В большинстве сценариев система работает с подмножеством данных (например, отвечает на конкретный запрос), однако все объекты вынуждены постоянно поддерживать свои локализованные заряды.

В квантовой механике частица не имеет определённого положения до измерения — её состояние описывается волновой функцией, размазанной по пространству. Только акт измерения (коллапс) даёт локализованное событие. Применяя эту аналогию к семантическим данным, можно предложить волновую версию NWF (Wave-NWF), в которой:

- При вводе данных генерируется волновой пакет $\psi_i(r, t)$, распространяющийся в семантическом пространстве;
- Вся система оперирует суперпозицией волн $\Psi(r, t) = \sum_i \alpha_i(t) \psi_i(r, t)$;
- Локализованное представление (заряд z_i , ковариация Σ_i) возникает только в момент, когда объект становится релевантным — например, при семантическом запросе или при необходимости синтеза данных.

Цель данной работы — формализовать математическую структуру Wave-NWF, показать её связь с исходной NWF, сравнить с существующими подходами (статическими эмбедингами, HDC, квантовыми моделями памяти) и продемонстрировать теоретические преимущества в масштабируемости и выразительности.

2. Математическая модель Wave-NWF

2.1. Семантическое гильбертово пространство

Пусть $Z = \mathbb{R}^D$ — пространство семантических ядер. Рассмотрим гильбертово пространство H квадратично интегрируемых комплексных функций на Z со скалярным произведением $\langle f | g \rangle = \int_Z \text{conj}(f(r)) g(r) dr$. Каждому объекту данных D_i ставится в соответствие волновая функция ψ_i in H . В отличие от классической NWF, где объект имеет фиксированное ядро z_i , волновая функция может быть распределённой.

В простейшем случае волновая функция выбирается как гауссов волновой пакет:

$$\psi_i(r) = \frac{1}{((2\pi)^{D/4} (\det \Sigma_i)^{1/4})} * \exp(-1/4 (r - z_i)^T \Sigma_i^{-1} (r - z_i) + i k_i \cdot (r - z_i))$$

Здесь z_i — центр волнового пакета, Σ_i — матрица ковариации (определяющая пространственную ширину), а k_i — волновой вектор, задающий направление и «импульс» в семантическом пространстве. Нормировка выбрана так, что $\langle \psi_i | \psi_i \rangle = 1$.

В отличие от исходной NWF, где заряд описывался действительным потенциалом $\phi_i(r)$, волновая функция комплексна и может интерферировать. Квадрат её модуля $|\psi_i(r)|^2$ интерпретируется как плотность вероятности обнаружить семантическое ядро объекта в точке r при измерении.

2.2. Суперпозиция и эволюция

Общее состояние семантической системы задаётся суперпозицией волновых функций объектов:

$$\Psi(r, t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(t) \psi_i(r, t)$$

Коэффициенты $\alpha_i(t)$ in \mathbb{C} могут изменяться во времени, отражая контекстную значимость объектов (например, в диалоге или при анализе потока данных). Начальное состояние обычно задаётся при вводе данных: $\psi_i(r, 0)$ — широкий пакет, отражающий начальную неопределённость, $\alpha_i(0)=1$.

Эволюция во времени может подчиняться уравнению Шрёдингера с эффективным гамильтонианом, описывающим «кинетическую энергию» в семантическом пространстве и потенциальные взаимодействия. Для простоты в данной работе мы рассматриваем статический режим, где ψ_i не зависят от времени, а вся динамика сосредоточена в коэффициентах $\alpha_i(t)$, которые адаптируются под запросы.

2.3. Коллапс волновой функции: возникновение заряда

Ключевое отличие от исходной NWF — коллапс, происходящий при запросе или

при необходимости материализовать объект. Пусть поступает запрос, который задаётся оператором измерения M_q . В простейшем случае запрос — это также волновая функция ψ_q (например, гауссов пакет, полученный кодированием запроса). Вероятность того, что объект i будет релевантен запросу, пропорциональна перекрытию:

$$P(\text{relevance}_i) \propto |\langle \psi_q | \psi_i \rangle|^2$$

После выбора (например, по порогу вероятности) происходит коллапс: волновая функция объекта редуцируется в локализованное состояние, которое можно отождествить с классическим зарядом NWF. Формально, для выделенного объекта мы заменяем его волновой пакет на классическое ядро z_i и ковариацию Σ_i , которые извлекаются из параметров волнового пакета. Аналогично, если объект ранее не был локализован, мы можем получить его ядро как математическое ожидание $z_i = \langle \psi_i | r | \psi_i \rangle$, а ковариацию $\Sigma_i = \langle \psi_i | (r - z_i)(r - z_i)^T | \psi_i \rangle$.

После коллапса дальнейшая обработка (например, поиск ближайших соседей, синтез данных) использует классический NWF-аппарат: метрику Махаланобиса, силу взаимодействия через интеграл перекрытия потенциалов и т.д. Это позволяет комбинировать волновое представление для массового хранения и классическое для точечных операций.

2.4. Интерференция и суперпозиция как вычислительный ресурс

Волновой подход позволяет вычислять семантические свойства системы без локализации отдельных объектов. Например, плотность смысла в точке r задаётся $|\Psi(r)|^2$. Это может быть использовано для:

- Семантического поиска по области: найти все объекты, чьи волновые функции имеют ненулевую амплитуду в заданной области;
- Выявления кластеров: пики $|\Psi(r)|^2$ соответствуют скоплениям семантических ядер;
- Вычисления семантических аналогов: операции над волновыми функциями (например, разность фаз) могут моделировать отношения между понятиями.

Важно, что эти вычисления могут выполняться приближённо, используя разложение по базису (например, по гауссовым орбиталям), что снижает сложность с $O(N)$ до $O(M)$, где M — число базисных функций.

3. Сравнение с исходной NWF и другими подходами

3.1. Исходная NWF (статический заряд)

В классической NWF представление каждого объекта фиксировано: хранится вектор z_i и ковариация Σ_i . Семантическое поле $\Phi(r) = \sum_i \phi_i(r)$ вычисляется как сумма действительных потенциалов. Это даёт чёткую геометрию, но требует:

- Памяти $O(N * (D + D^2))$ для хранения полных ковариаций (или $O(N D)$ для диагональной аппроксимации);
- Времени $O(N)$ для любого вычисления поля.

Волновая версия (Wave-NWF) хранит параметры волновых пакетов (центры, ковариации, волновые векторы) — тот же объём памяти, но позволяет отказаться от постоянного удержания локализованных зарядов. Коллапс по запросу сокращает вычислительные затраты на операции, требующие

локализации, до $O(K)$, где K — число объектов, попавших в фокус. При этом суперпозиция может обрабатываться в сжатом базисе.

3.2. Векторные базы данных (FAISS, Milvus)

Векторные БД хранят статические эмбединги и используют ANN-индексы. Они не учитывают неопределённость, не поддерживают динамическое обновление без переиндексации и не позволяют выполнять семантические операции на уровне полей. Wave-NWF, напротив, сохраняет неопределённость (через ширину пакета), позволяет инкрементально добавлять объекты (просто добавляя волновую функцию) и предоставляет богатую алгебру взаимодействия.

3.3. Hyperdimensional Computing (HDC)

HDC оперирует высокоразмерными случайными векторами и алгебраическими операциями (связывание, упаковка). Это даёт устойчивость к шуму, но семантика распределена по всему вектору, и интерпретация затруднена. Wave-NWF оперирует в непрерывном пространстве малой размерности, где каждый объект имеет локализованную область влияния, что упрощает интерпретацию и позволяет использовать геометрические методы.

3.4. Квантовые модели памяти

Существуют работы по квантовым ассоциативным памяти, где информация хранится в суперпозиции состояний кубитов, а поиск реализуется через квантовые алгоритмы. Однако они требуют квантового железа. Wave-NWF является классической вычислительной моделью, вдохновлённой квантовой аналогией, и может выполняться на традиционных процессорах. В то же

время она совместима с потенциальным переходом на квантовые ускорители.

4. Теоретическое обоснование и ключевые теоремы

Теорема 1 (Сохранение семантической информации при коллапсе)

Для любого объекта, представленного волновым пакетом ψ_i , коллапс в локализованное состояние с центром $z_i = \langle \psi_i | r | \psi_i \rangle$ и ковариацией Σ_i не изменяет математического ожидания любых полиномиальных наблюдаемых первого и второго порядка. Более того, для гауссовых волновых пакетов это представление является минимальным по энтропии среди всех локализованных распределений с теми же моментами.

Доказательство: Для гауссового пакета, заданного формулой выше, среднее и ковариация вычисляются непосредственно. Классический заряд NWF с теми же z_i , Σ_i воспроизводит те же значения первых двух моментов. Поскольку гауссово распределение максимизирует энтропию при фиксированных моментах, коллапс в детерминированное представление теряет энтропию, но сохраняет информацию, необходимую для линейных операций.

Теорема 2 (Интерференция как мера семантического конфликта)

Рассмотрим два объекта с волновыми функциями ψ_1 , ψ_2 . Пусть $\Phi_{\text{classic}}(r) = \phi_1(r) + \phi_2(r)$ — классическое поле NWF (сумма потенциалов), а $\Psi_{\text{wave}}(r) = \psi_1(r) + \psi_2(r)$ — волновая суперпозиция. Тогда разница между квадратом модуля волновой суммы и классической суммой квадратов даёт интерференционный член $2 \operatorname{Re}(\operatorname{conj}(\psi_1(r)) \psi_2(r))$, который может быть положительным или

отрицательным. Этот член интерпретируется как семантическая интерференция: в областях, где объекты когерентны, смысл усиливается; где противофазны — ослабляется.

Доказательство: Непосредственно из определения

$$|\psi_1 + \psi_2|^2 = |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 + 2 \operatorname{Re}(\operatorname{conj}(\psi_1) \psi_2).$$

В классическом случае $\rho_i = |\psi_i|^2$ (если потенциал интерпретировать как плотность), поэтому интерференция является квантовоподобным эффектом, отсутствующим в классической NWF.

Теорема 3 (Вычислительная сложность селективной суперпозиции)

Пусть в системе хранится N волновых пакетов, каждый из которых может быть разложен по M базисным функциям (например, гауссовым орбиталям) с точностью ϵ . Тогда для вычисления значения $\Psi(r)$ в произвольной точке требуется $O(M)$ операций, независимо от N . Если требуется локализовать K объектов (коллапс), то сложность составляет $O(K * M)$ после предварительного отбора.

Доказательство: Представление $\Psi(r) = \sum_i \alpha_i \psi_i(r)$. Если каждый ψ_i принадлежит M -мерному линейному подпространству (например, натянутому на базис), то Ψ также лежит в этом подпространстве, и его координаты в базисе есть $\sum_i \alpha_i c_{i,\mu}$, что требует $O(N M)$ для построения, но после построения координат вычисление в любой точке — $O(M)$. Применяя методы приближённого разложения (например, с помощью быстро убывающих хвостов), можно добиться $M \ll N$.

5. Обсуждение

Предложенная волновая версия NWF открывает новые возможности для построения семантических систем:

- Масштабируемость. Благодаря переходу к базисному разложению и отложенной локализации, система может работать с миллиардами объектов без необходимости постоянного удержания их точных положений.

- Когерентная обработка. Интерференция позволяет естественным образом моделировать семантическую неоднозначность, конфликт понятий, а также комбинировать знания из разных источников с фазами, отражающими доверие или контекст.

- Гибкость коллапса. Выбор момента коллапса — по запросу, по порогу неопределённости, по времени — даёт адаптивность под различные сценарии использования (поточковая обработка, интерактивные системы, аналитика больших данных).

- Связь с квантовыми вычислениями. Поскольку математика Wave-NWF совпадает с квантовой механикой конечномерных систем, она может быть напрямую отображена на квантовые схемы. Это открывает перспективу использования квантовых ускорителей для операций семантического поиска и вывода.

Сравнение с исходной NWF показывает, что Wave-NWF не отменяет классическую модель, а дополняет её, предоставляя более эффективный способ работы с большими объёмами данных, при этом сохраняя все преимущества байесовского подхода (учёт неопределённости, инкрементальность, семантическое сжатие).

6. Заключение

В работе представлено развитие парадигмы Нейровесовых Полей, в котором семантическое представление данных трактуется как волновая функция в гильбертовом пространстве. Введены понятия волнового пакета, суперпозиции, интерференции и коллапса по запросу. Построен математический аппарат, сравнительный анализ с исходной NWF, векторными базами данных, HDC и квантовыми моделями. Показано, что волновой подход позволяет существенно снизить вычислительную сложность операций, сохраняя при этом выразительность и преимущества байесовского представления. Дальнейшие исследования будут направлены на реализацию прототипа Wave-NWF на основе методов разреженного разложения по базису и интеграцию с существующими системами семантического поиска

.Список литературы

[1] Белоусов Р.С. Нейровесовые поля: теория семантического континуума для хранения и обработки информации. Препринт, 2026.[2] Kanerva P. Hyperdimensional Computing: An Introduction to Computing in Distributed Representation with High-Dimensional Random Vectors. Cognitive Computation, 2009.[3] Ventura D., Martinez T. Quantum associative memory. Information Sciences, 2000.[4] Friston K. The free-energy principle: a unified brain theory? Nature Reviews Neuroscience, 2010.[5] Kingma D.P., Welling M. Auto-Encoding Variational Bayes. ICLR, 2014.[6] Tancik M. et al. Fourier features let networks learn high frequency functions in low dimensional domains. NeurIPS, 2020.

