

# Алгоритм для программирования реконфигурируемого оптического интерферометра с произвольной архитектурой

С. С. Кузьмин<sup>1,2</sup>, С. С. Страупе<sup>1,2</sup>, И. В. Дьяконов<sup>1,2</sup>, С. П. Кулик<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Центр Квантовых Технологий, Физический факультет, Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий», Москва, Россия

Ключевой особенностью современного интегрального линейного интерферометра является реконфигурируемость, которая позволяет устройству изменять своё влияние на входные оптические моды по требованию. Мы разработали эффективный алгоритм программирования линейного оптического интерферометра. Было использовано обучение с учителем численной модели. Обученная модель используется для быстрого нахождения требуемых фазовых сдвигов для заданного унитарного преобразования с использованием процедуры оптимизации, применяемой к модели, а не к физическому устройству. Нам удалось обучить модель интерферометра до 20 мод.

*Ключевые слова:* Линейная оптика, Линейно-оптические квантовые вычисления, Машинное обучение в линейной оптике.

*Цитирование:* Кузьмин, С. С. Алгоритм для программирования реконфигурируемого оптического интерферометра с произвольной архитектурой / С. С. Кузьмин, С. С. Страупе, И. В. Дьяконов, С. П. Кулик // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 302–306.

## Введение

Линейные оптические интерферометры быстро стали незаменимым инструментом в квантовой оптике [1] и оптической обработке информации [2]. Ключевой особенностью современного интегрального линейного интерферометра является реконфигурируемость, которая позволяет устройству изменять свое влияние на входные оптические моды по требованию. Эта возможность сделала линейные оптические схемы особенно привлекательными для задач обработки информации. В частности, реконфигурируемые интерферометры являются основными компонентами современных экспериментов по линейным оптическим квантовым вычислениям [3] и рассматриваются как аппаратные ускорители для приложений глубокого обучения нейронных сетей [4].

Целью данной работы была разработка алгоритма обучения для построения архитектурно-независимой модели реконфигурируемого оптического интерферометра.

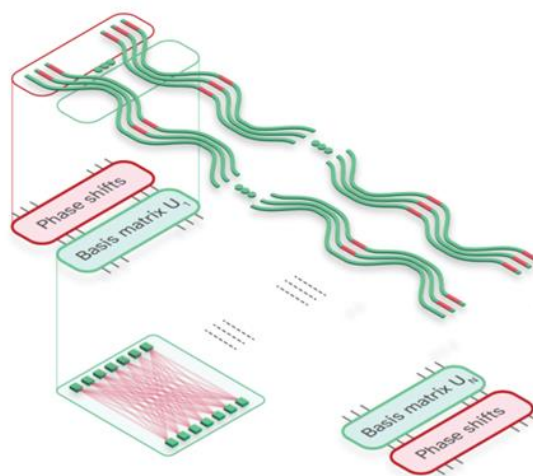
## 1. Мотивация

Актуальность данной работы обусловлена тем, что в настоящее время существует проблема программирования интерферометров различной архитектуры [5], которая не имеет простого аналитического описания и программирование таких устройств возможно только с использованием оптимизационных процедур. Процедура оптимизации настройки преобразования реального физического интерферометра требует экспериментального

выполнения ресурсоемкой процедуры восстановления матрицы преобразования (томографии) [6] на каждой итерации выбранного алгоритма оптимизации. С точки зрения конечного пользователя необходимость оптимизировать устройство каждый раз, когда необходимо изменить преобразование, неприемлема. Во-первых, оптимизация в многомерном пространстве параметров сама по себе является трудоемкой процедурой, требующей сложной настройки, и, кроме того, нет гарантии достижения глобального минимума. Во-вторых, алгоритмы, обеспечивающие быструю сходимость в задачах многопараметрической оптимизации, обычно основаны на градиенте, а точность оценки градиента целевой функции, реализуемой физическим устройством, ограничена шумом измерения.

## 2. Наш подход

В данной работе мы разработали эффективный алгоритм программирования линейного оптического интерферометра на примере архитектуры [5] (Рис. 1), поскольку она описывает любые интерферометры, содержащие независимые фазовращатели и светоделители. Мы использовали один из основных методов машинного обучения — обучение численной модели с учителем, который широко применяется при обучении нейронных сетей [7]. Модель интерферометра обучается с использованием набора унитарных шаблонов преобразования, соответствующих разным фазовым задержкам в плечах интерферометра. Обученная модель используется для быстрого нахождения требуемых фазовых сдвигов для заданного унитарного преобразования с использованием процедуры оптимизации, применяемой к модели, а не к физическому устройству.

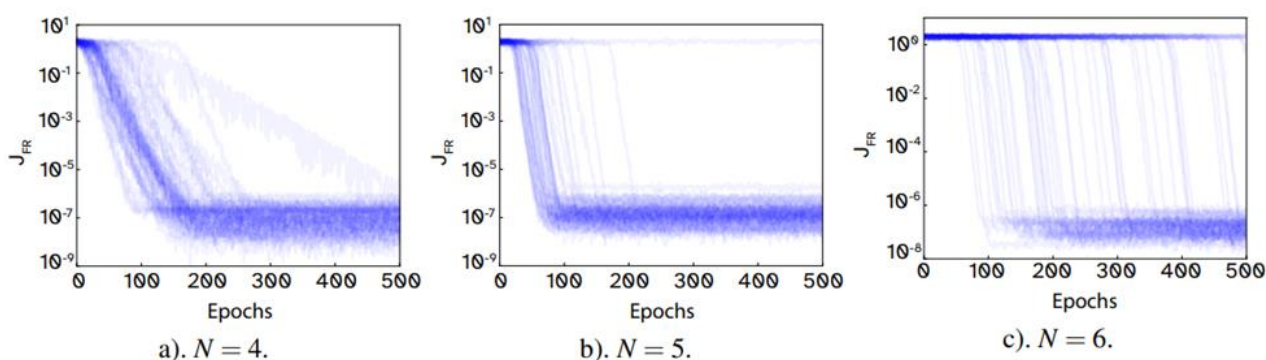


**Рис. 1.** Схема структуры многомодового интерферометра и схема его интегральной фотонной реализации. Базисные матрицы описывают распределение света между каналами интерферометра. Соответствующие интегрированные элементы могут быть реализованы в виде волноводных решеток, в которых волноводы связаны и, таким образом, энергия передается между разными волноводами.

Наш алгоритм обучения разбит на два этапа: этап обучения - поиск модели интерферометра с использованием обучающего набора унитарных преобразований и этап программирования - определение фазовых задержек модели интерферометра, соответствующих требуемому преобразованию. В работе также выведен точный аналитический алгоритм вычисления градиентов целевой функции, как для этапа обучения, так и для этапа программирования модели, что требует небольших вычислительных ресурсов.

### 3. Основные результаты

Результаты численного моделирования показали, что для интерферометра до 6 мод (Рис. 2) включительно алгоритм обучения работает без каких-либо априорных знаний об элементах внутренней структуры. С учетом априорных знаний алгоритм обучения работает для схемы до 20 режимов. В результате работы была написана библиотека на python для обучения модели (код доступен на GitLab <https://gitlab.com/SergeiKuzmin/nnoptic>).



**Рис. 2.** Примеры обучения для разного количества оптических мод  $N$ . Мы строим функциональную сходимость Фробениуса на тестовом наборе данных по номеру эпохи для 50 различных экземпляров алгоритма оптимизации (для каждого экземпляра мы случайным образом выбирали исходные базисные матрицы). Случай а) - количество оптических мод  $N = 4$ , размер обучающей выборки  $M = 7$ , б) -  $N = 5$ ,  $M = 30$ , в) -  $N = 6$ ,  $M = 230$ .

### Заключение

Продемонстрированный подход к программированию интерферометров отличается несколькими важными преимуществами. Прежде всего метод не зависит от архитектуры интерферометра. Это означает, что и суть алгоритма, и математическая структура подходят для любой выбранной архитектуры. Это предположение остается в силе, если смесители мод и фазовращатели не рассматриваются как независимые элементы. Затем на выходе алгоритма обучения получается полная модель интерферометра с учетом преобразования элементов смещения мод в изготовленном устройстве. Наконец, представленный алгоритм представляет собой процедуру реконструкции внутренних фиксированных оптических элементов сложной интерферометрической схемы. Следовательно, его можно использовать

для исследования качества оптических подсхем, расположенных внутри большей оптической схемы.

Узкие места предлагаемого алгоритма связаны с экспериментальными проблемами. Метрика Фробениуса требует точного измерения модуля и фазы унитарных элементов. Другая проблема, которая не охватывается нашим алгоритмом, возникает из-за перекрестных помех между фазовращателями. Наша структура предполагает, что фазы в разных путях активируются независимо, что не так из-за перекрестных помех между различными элементами фазовой модуляции. К счастью, реализации встроенного фотонного модулятора обычно демонстрируют чрезвычайно низкие перекрестные помехи.

Мы считаем, что наши результаты откроют возможности для использования новых архитектур программируемых оптических интерферометров как для классических, так и для квантовых приложений. Более подробное изложение этих идей вы можете прочитать в [8].

### Благодарность

Работа поддержана госкорпорацией «Росатом» в рамках Дорожной Карты Квантовые Вычисления (Договор No. 868-1.3-15/15-2021 от 5.10.2021 и No. P2154 от 24.11.2021).

### Список источников

- [1] **Carolan, J.** Universal linear optics / J. Carolan, C. Harrold, C. Sparrow, E. Martin-Lopez, N. J. Russell, J. W. Silverstone, P. J. Shadbolt, N. Matsuda, M. Oguma, M. Itoh, G. D. Marshall, M. G. Thompson, J. C. F. Matthews, T. Hashimoto, J. L. O'Brien, A. Laing // *Science*. — 2015. — Vol. 349. — № 6249. — P. 711-716.
- [2] **Harris, N. C.** Linear programmable nanophotonic processors / N. Harris, J. Carolan, D. Bunandar, M. Prabhu, M. Hochberg, T. Baehr-Jones, M. L. Fanto, A. Matthew Smith, C. C. Tison, P. M. Alsing, D. Englund // *Optica*. — 2018. — Vol. 5. — № 12. — P. 1623-1631.
- [3] **Wang, J.** Multidimensional quantum entanglement with large-scale integrated optics / J. Wang, S. Paesani, Y. Ding, R. Santagati, P. Skrzypczyk, A. Salavrakos, J. Tura, R. Augusiak, L. Mancinska, D. Bacco, D. Bonneau, J. W. Silverstone, Q. Gong, A. Acin, K. Rottwitt, L. K. Oxenlowe, J. L. O'Brien, A. Laing, M. G. Thomson // *Science*. — 2018. — Vol. 360. — № 6386. — P. 285-291.
- [4] **Hamerly, R.** Large-scale optical neural networks based on photoelectric multiplication / R. Hamerly, L. Bernstein, A. Sludds, M. Soljacic, D. Englund // *Physical Review X*. — 2019. — Vol 9. — № 2. — P. 021032.
- [5] **Saygin, M. Y.** Robust architecture for programmable universal unitaries / M. Y. Saygin, I. V. Kondratyev, I. V. Dyakonov, S. A. Mironov, S. S. Straupe, S. P. Kulik // *Physical review letters*. — 2020. — Vol. 124. — № 1. — P. 010501.
- [6] **Tillman, M.** On unitary reconstruction of linear optical networks / M. Tillman, C. Schmidt, P. Walther // *Journal of Optics*. — 2016. — Vol. 18. — № 11. — P. 114002.
- [7] **Ferrari, S.** Smooth function approximation using neural networks / S. Ferrari, R. Stengel // *IEEE Transactions on Neural Networks*. — 2005. — Vol. 16. — № 1. — P. 24-38.
- [8] **Kuzmin, S.** Architecture agnostic algorithm for reconfigurable optical interferometer programming / S. Kuzmin, I. Dyakonov, S. Kulik // *Optics Express*. — 2021. — Vol. 29. — № 23. — P. 38429-38440.

# Architecture agnostic algorithm for reconfigurable optical interferometer programming

*S. S. Kuzmin, S. S. Straupe, I. V. Dyakonov, S. P. Kulik*

Center for Quantum Technologies, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

A key feature of a modern integrated linear interferometer is reconfigurability, which allows the device to change its influence on input optical modes on demand. We have developed an efficient programming algorithm for a linear optical interferometer. Supervised learning of the numerical model was used. The trained model is used to quickly find the required phase shifts for a given unitary transform using an optimization procedure applied to the model rather than the physical device. We managed to train the interferometer model up to 20 modes.

*Keywords:* Linear optics, Linear optical quantum computing, Machine learning in linear optics.