

с отдельными модами в сердцевине волокна. Всё же однозначное отображение режимов на самом деле не является существенным в когерентных сетях SDM. Точечные ответвители и фотонные фонари, которые часто используются в когерентных сетях, обычно скремблируют одномодовые входы по ортогональной комбинации всех модовых каналов в конкретной сердцевине волокна. Затем цифровая обработка сигналов (DSP) MIMO позволяет восстанавливать отдельные ортогональные модальные каналы на конце волокна. Также нет необходимости демультиплексировать каждую моду в данной группе мод, поскольку почти вырожденные моды будут уже подвергнуты значительному перекрестному соединению вдоль волокна. Однако, есть очень значительные преимущества однозначного преобразования мод с точки зрения компенсации модовых потерь (MDL) и дифференциальной задержки мод (DMD). В когерентных сетях SDM MIMO DSP очень сильно зависит от MDL и DMD. MDL провоцирует снижение емкости системы и увеличение вероятности выхода из строя. MIMO DSP может полностью восстановить модальные каналы данных путем инвертирования матрицы передачи только в том случае, если скремблирование является унитарным, то есть MDL почти равен нулю. Поэтому возможность отображения режимов очень полезна с точки зрения выравнивания MDL, позволяющая изменять мощность запуска режима или коэффициент усиления режима. Последнее может быть достигнуто, например, путем изменения мощности модальной накачки с использованием варианта мультиплексора мод, который работает на длине волны 980 нм. Более того, мультиплексоры с однозначным отображением мод позволяют компенсировать DMD, не требуя больших длин волокон, компенсирующих интермодальную дисперсию, или низких волокон DMD. DMD определяет количество отводов, необходимых для выравнивания перекрестных помех внутри ядра (и / или между ядрами), и, таким образом, компенсация DMD необходима, чтобы избежать слишком высокой сложности DSP и минимизировать требования к энергии. Для систем большой протяженности обычно используется минимизация DMD и MDL. Мультиплексоры с однозначным отображением режимов также могут использоваться для передачи SDM по волокнам с низким общим перекрестным взаимодействием с использованием прямого обнаружения, не требуя MIMO DSP30.

Мультиплексоры FM-MCF являются значительным достижением в стремлении к практическому мультиплексированию с пространственным разделением для преодоления нехватки пропускной способности оптического волокна.

#### Список литературы

1. <https://www.photonics-bretagne.com/en/perfos-rto/products/specialty-optical-fibers/?gclid=CjwKCAiA-L9BR>

BQEiwAbm5ftfB9mYK3QyTYSimp8yF7m7ye4Coic6Ozh tR-tCQzpyZtmBmtpSRoCo9UQAvD\_BwE

2. <https://siblec.ru/telekommunikatsii/volokonno-opticheskie-sistemy-peredachi/9-opticheskie-komponenty-dlya-sistem-peredachi-i-opticheskikh-setej/9-7-opticheskie-filtry-multipleksory-i-demultipleksory>

3. [https://www.researchgate.net/publication/307436313\\_Monolithic\\_Multicore\\_Fibre\\_Mode-Multiplexer](https://www.researchgate.net/publication/307436313_Monolithic_Multicore_Fibre_Mode-Multiplexer)

4. <http://www.tnivos.ru/pdf/mult.pdf>

### ДЕКОМПОЗИЦИЯ МОД В МАЛОМДОВЫХ ВОЛОКНАХ С ПОМОЩЬЮ ГЛУБОКОЙ СВЁРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Иванова М.А., Иванова Д.А.

*Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ),  
Самара, e-mail: masha13-99@yandex.ru*

В связи с быстрым прогрессом исследований FMM, очень востребовано описание свойств пространственных мод, излучаемых из FMM, так называемым методом разложения мод (MD). С помощью методов MD можно оценить информацию об амплитуде и фазе каждой собственной моды в оптическом волокне, обеспечивая полное оптическое поле и свойства луча, связанные с полем, например, волновой фронт и коэффициент распространения пучка.

Фактически, MD в реальном времени вносит большой вклад в динамический мониторинг пространственной эволюции мод FMM или оптимизацию производства устройств с разрешением мод. Недавний прогресс в успешном применении сверточных нейронных сетей (CNN) в оптике и фотонике заставил многих задаться вопросом: достигим ли аналогичный успех при изучении MD для FMM или даже многомодового волокна. По сравнению с существующими алгоритмами наиболее привлекательным преимуществом подхода, основанного на глубоком обучении, является то, что он позволяет достичь отличной производительности в реальном времени с помощью обученной нейронной сети. Для выполнения MD требуется всего один прямой проход (обычно несколько миллисекунд) и никакой инициализации не требуется. На практике, поскольку коэффициенты наземной истинной моды неизвестны, единственный надежный способ оценить точность предполагаемых модальных амплитуд и фаз – это восстановить диаграмму направленности и затем измерить ее отличие от захваченного изображения интенсивности. Без информации о фазе каждой собственной моды диаграмма направленности не может быть восстановлена для проверки MD, что значительно затрудняет ее практическое применение.

Собственные моды могут быть описаны линейно поляризованными (LP) модами на основе приближения слабого наведения, и их количество, поддерживаемое в волокне, зависит от параметров волокна. Следует отметить,

что знак фазовой неоднозначности существует только при одном изображении интенсивности, участвующем в МД, потому что в этом случае нельзя различить действительное и сопряженное поля. С другой стороны, неоднозначность не повлияет на оценку действительности МД. Более того, предоставления точных весовых коэффициентов мод достаточно в таких случаях, как мониторинг динамики нестабильности режима и анализ модального усиления.

Доказано, что сверточная нейронная сеть (CNN) очень эффективна для обработки, которые содержат различные типы слоев. У разных слоев CNN есть свои особые функции. Слой свертки использует набор фильтров, чтобы научиться извлекать нужные функции из входного изображения для конкретной задачи. Слой объединения постепенно удаляет избыточную информацию и уменьшают размер карт функций, что значительно снижает затраты на вычисления и память. Полностью связанный слой преобразует выходные данные предыдущих слоев в одномерный вектор определенной длины, что представляет собой глубокое понимание всего изображения.

Сеть учится оценивать вес и фазы мод по одному серому изображению интенсивности ближнего поля. Во время обучения входные изображения генерируются случайным образом на основе суперпозиции теоретических собственных мод, вычисленных в соответствии с известными параметрами волокна. Вес и фазы режима объединяются в вектор метки.

Здесь следует отметить, если фазы используются непосредственно в векторе меток, сеть не может достичь конвергенции, потому что одно изображение может иметь две метки из-за неоднозначности фаз, что может запутать CNN. Чтобы решить эту неоднозначность, используют значение косинуса для представления реальных фаз в векторе меток, чтобы гарантировать согласованность обучающих данных. Диапазон значений косинуса линейно масштабируется от  $[-1,1]$  до  $[0,1]$ , и последний слой активации сигмоида должен гарантировать достоверность выходных прогнозов.

На этапе обратного распространения процедуры обучения параметры сети обновляются итеративно посредством стохастического градиентного спуска (SGD) на основе потерь MSE. На этом шаге можно получить предсказанные модальные веса непосредственно из выходного вектора сети. Для относительной фазы мы собираем все возможные комбинации на основе предполагаемых значений косинуса. Окончательная предсказанная комбинация фаз затем может быть определена из этих кандидатов путем поиска максимума корреляции.

В идеальном случае корреляция имеет максимум 1, когда восстановленный шаблон совпадает с входным. Кроме того, есть две почти идентичные максимальные корреляции, соответствующие действительному и сопряженному полям соответственно.

Разложение для многомодовых лучей, состоящих из восьми или более режимов, требует шаблонов с более высоким разрешением, и точность, возможно, снизится из-за конечного разрешения изображения и сильно увеличивающихся неоднозначных шаблонов. Чтобы повысить точность МД этих многомодовых лучей, можно использовать профиль луча в дальней зоне в качестве дополнительных входных данных, потому что аналогичные лучи ближнего поля с разными модовыми коэффициентами имеют совершенно разные диаграммы направленности в дальней зоне. Как в ближнем, так и в дальнем поле диаграммы направленности пучка модовые коэффициенты могут быть определены однозначно и почти не возникает неоднозначности.

С применением CNN, скорость МД может составлять 30 мс на кадр на GPU.

#### Список литературы

1. <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-svyortochnyh-neyronnyh-setey-dlya-zadachi-klassifikatsii-izobrazheniy>
2. [https://kpfu.ru/staff\\_files/F1493580427/NejronGafGal.pdf](https://kpfu.ru/staff_files/F1493580427/NejronGafGal.pdf)
3. <https://habr.com/ru/company/microsoft/blog/316456/>
4. <https://www.dissercat.com/content/malomodovye-volokonno-opticheskie-linii-peredachi-kompaktnykh-mnogoportovykh-infokommunikats>
5. [http://applied.photonics.pstu.ru/\\_res/fs/4342file.pdf](http://applied.photonics.pstu.ru/_res/fs/4342file.pdf)