

МНОГОЯДЕРНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ С СЕЛЕКТИВНЫМ РЕЖИМОМ

Иванова Д.А., Иванова М.А.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), Самара, e-mail: mashadasha.13-99@yandex.ru

В связи с быстрорастущим глобальным трафиком данных возникает потребность в поиске новых технологий и решений, позволяющих избежать нехватки пропускной способности оптических каналов. Потребность в передаче еще больших объемов данных продолжает расти и требует разработки новых технологий оптической связи для преодоления предела пропускной способности, который должен быть достигнут в ближайшем будущем.

Мультиплексирование с пространственным разделением каналов (SDM) является наиболее многообещающим решением, и оно включает добавление дополнительных каналов данных в поперечное сечение оптического волокна. SDM предполагает использование либо многосердцевинного волокна (MCF), в котором несколько сердцевин одномодового волокна помещены в общую оболочку, или многомодовых волоконных световодов (MMF), в которых различные поперечные моды (или группы мод), поддерживаемые волоконным световодом, используются в качестве индивидуальных каналов данных в мультиплексировании с разделением режимов (MDM).

Монолитный избирательный по модам многомодовый многожильный волоконный мультиплексор, способный адресовать отдельные моды такого волокна. Эти компактные мультиплексоры работают в телекоммуникационных диапазонах $S + C + L$ и записываются в фотонный чип с помощью сверхбыстрой лазерной записи. Они обеспечивают одновременное мультиплексирование режимов LP₀₁, LP_{11a} и LP_{11b} всех сердечников в трехмодовом четырехжильном оптоволокне с превосходными коэффициентами гашения мод и низкими вносимыми потерями. Устройства масштабируются до большего количества режимов и ядер и, следовательно, могут представлять собой технологию, обеспечивающую практическое использование сверхвысокой емкости плотного мультиплексирования с пространственным разделением.

В последнее время, в попытках потенциально обеспечить еще большее увеличение пропускной способности оптоволокна, основное внимание было обращено на объединение двух подходов с использованием маломодового многоядерного оптоволокна (FM-MCF). FM-MCF имеет широкую популярность в обеспечении

наиболее практичного баланса между несвязанными SDM высокого порядка и MDM низкого порядка.

FM-MCF хоть и обещает существенное увеличение пропускной способности волокна, практические методы возбуждения отдельных режимов, поддерживаемые близко расположенными ядрами, все еще требуются для возможного развертывания сетей FM-MCF. Однако большинство демонстраций FM-MCF до настоящего времени основывались на сложных, зачастую непрактичных и, обычно с потерями пространственных мультиплексорах со свободным пространством, в некоторых случаях, требующих адресации отдельных ядер одно за другим. По этим причинам, чтобы сделать SDM FM-MCF более практичным, были предприняты попытки использовать простые технологии на основе волноводов с потенциально низкими потерями и небольшой площади основания.

Мультиплексор FM-MCF позволяет мультиплексировать режимы LP₀₁, LP_{11a} и LP_{11b} каждой отдельной жилы 4-жильного волокна в полосе пропускания, превышающей диапазоны $S + C + L$. За счет использования решетки соединителя с конусным режимом работы, интегрированной с архитектурой вентилятора, достигается функциональность селективного режима. По отношению к фотонным фонарям, мультиплексоры FM-MCF, имеют значительно улучшенную селективность по модам. Однако они вносят более высокие потери. Маленькая занимаемая площадь мультиплексора FM-MCF может обеспечить интеграцию в будущие транспондеры для сетей когерентного и прямого обнаружения. В когерентных сетях функция выбора режима позволяет использовать компенсацию MDL и DMD, причем последняя значительно снижает сложность MIMO DSP.

Также мультиплексоры FM-MCF могут использоваться в пассивных оптических сетях (PON) с временным мультиплексированием (TDM). Помимо этого, универсальность используемой технологии изготовления может позволить масштабировать возможность мультиплексирования на гораздо большее количество ядер и режимов. Используется сверхбыстрая лазерная надпись также имеет высокую повторяемость и подходит для производства с масштабированием по объему. Учитывая резкое увеличение пропускной способности оптического волокна, которое может быть возможным с помощью FM-MCF, этот практичный и масштабируемый подход к мультиплексированию ядер представляет собой значительный шаг вперед к реализации практического DSMD.

Пространственные мультиплексоры часто сопоставляют одномодовые входы напрямую

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

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 FMMF, очень востребовано описание свойств пространственных мод, излучаемых из FMMF, 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 FMMF 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 FMMF 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,