

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

Комарова Марианна Алексеевна

младший научный сотрудник

Большаков Максим Вячеславович

канд. физ.–мат. наук, доцент, преподаватель

Кундикова Наталия Дмитриевна

д-р физ.–мат. наук, профессор, заведующий кафедрой

ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ)

г. Челябинск, Челябинская область

ИННОВАЦИОННЫЙ МЕТОД ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО МОМЕНТА ФОТОНА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ЧЕРЕЗ МНОГОМОДОВОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

***Аннотация:** в данной работе предлагается новый метод передачи информационного сигнала через многомодовое оптическое волокно, в основе которого лежит определение набора орбитальных моментов светового поля на приемнике, при условии, что на входной торце оптического волокна подается сигнал с заданными параметрами (кодированный информационный сигнал). Кодирование осуществляется с использованием орбитального момента фотона.*

***Ключевые слова:** орбитальный момент, оптическое волокно, моды оптического волокна.*

Использование многомодовых волокон в оптических линиях связи по сравнению с маломодовыми волокнами дает большие преимущества, так как позволяет передавать больший объем информации. Распространение в волокне нескольких мод с использованием модового уплотнения дает возможность параллельной передачи данных. Принцип модового уплотнения данных состоит в использовании разных групп мод многомодового волокна в качестве независимых информационных каналов в многомодовых волоконно–оптических линиях связи. Применение метода модового уплотнения сдерживалось наличием силь-

ной взаимной связи мод в прежде выпускавшихся волокнах. Однако в настоящее время уровень межмодовой связи в многомодовых оптических волокнах значительно снизился. Благодаря этому в последнее десятилетие появилось много работ посвященных передаче информации по отдельной моде многомодового оптического волокна. Цель этих исследований – повышение информационной емкости многомодовых волоконно–оптических линий связи путем увеличения их коэффициента широкополостности. Особенно перспективно использование многомодовых волокон для пространственного модового мультиплексирования [1], параллельной передачи данных [2] и передачи изображения через волокно [3].

Существуют различные способы возбуждения мод оптического волокна и их селекции на выходе. Среди методов возбуждения мод невысокого порядка – периодическая деформация (сдавливание или изгибание) волокна [4]. В этом случае энергия перекачивается из фундаментальной LP01 моды в следующую LP11 моду. Возбуждение LP11 мод может достигаться с помощью фазовой модуляции смещением диэлектрических пластинок, помещенных в волновой фронт гауссова пучка [5].

В работе [6] для селекции мод на выходе ступенчатого волокна, был использован 5–порядковый амплитудный бинарный фильтр, закодированный по методу Ли и согласованный с пятью первыми LP–модами для ступенчатого оптического волокна с числом отсечки $V=5$. Основным недостатком упомянутых амплитудных элементов – низкая энергетическая эффективность: для кодированных амплитудных голограмм – менее 10% в центральном дифракционном порядке. Если же рассматривается многопорядковый оптический элемент, то эффективность уменьшается во столько же раз, сколько используется полезных порядков. Желание иметь один фильтр, согласованный с достаточно большим (20–30) количеством участвующих в анализе мод, сталкивается с проблемой невозможности детектировать корреляционный пик из–за слишком малого количества энергии, идущей в каждый полезный порядок.

В оптическом волокне каждая мода несет орбитальный момент определен-

ной величины, и может рассматриваться как поток фотонов с заданным орбитальным моментом, который в зависимости от параметров оптического волокна может иметь значения в широком диапазоне. В последнее время принято считать, что орбитальный момент фотона имеет огромный потенциал для использования в квантовой информатике, поскольку имеет большее число степеней свободы [7]. Информация может быть декодирована с помощью перемножения набора состояний, так как фотон несет большое количество информации, распределенной по его спиновым и орбитальным квантовым состояниям. Использование орбитального момента позволяет увеличить количество параметров, по которым можно модулировать оптические пучки, а именно, любая информация, содержащаяся в сигнале, может быть декодирована в фазу, интенсивность, поляризацию, частоту и орбитальный момент света. Для передачи информации с использованием кодирования по орбитальному моменту необходимо не только вводить в волокно излучение с заданным набором орбитального момента, но и уметь определять модовый состав излучения на выходе из оптического волокна. Таким образом, важнейшим вопросом при разработке и исследовании многомодовых волоконно–оптических линий связи является разложение излучения, распространяющегося в оптическом волокне, по модам. Существуют множество таких методов [8–14]. Универсального же метода экспериментального анализа модового состава излучения многомодовых волокон с любыми параметрами нет до настоящего момента.

В данной работе предлагается новый универсальный для оптических волокон с различными параметрами метод определения модового состава излучения, распространяющегося в оптическом волокне, в основе которого лежит разложение комплексного светового поля по неортогональным модам. Это позволит применить принципы временного уплотнения сигнала и модового уплотнения сигнала, где каждая из распространяющихся в многомодовом волокне пространственных мод рассматривается как отдельный канал, несущий свой сигнал. Кодирование информации предлагается осуществлять комплексной функцией распределения мод. Прекодировка осуществляется введением фотонов с

заданным орбитальным моментом на входном торце волокна. Из зарегистрированного светового поля на выходном торце волокна необходимо выделить информацию об орбитальных моментах каждой из мод.

Итак, цель данной работы заключается в осуществлении временного и модового уплотнения данных, т.е. определение набора орбитальных моментов светового поля, распространяющегося в оптическом волокне, на выходном торце волокна с известными параметрами на входном торце (решение так называемой обратной задачи). Для этого был определен модовый состав излучения оптического волокна путем разложения комплексного светового поля по неортогональным модам.

Рассмотрим распространение света в оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления. В приближении слабонаправляющего волновода можно записать четыре поляризационные моды в поперечном сечении на длине для любого значения орбитального момента $m (m \geq 0)$ и радиального квантового числа в следующей форме [8]:

$$\begin{aligned} M_{m,N}^{(1)}(x, y, z) &= [\cos(m\varphi)e_x - \sin(m\varphi)e_y] \cdot F_{m,N}(x, y) \cdot e^{iz\beta_{m,N}^1}, \\ M_{m,N}^{(2)}(x, y, z) &= [\cos(m\varphi)e_x + \sin(m\varphi)e_y] \cdot F_{m,N}(x, y) \cdot e^{iz\beta_{m,N}^2}, \\ M_{m,N}^{(3)}(x, y, z) &= [\sin(m\varphi)e_x + \cos(m\varphi)e_y] \cdot F_{m,N}(x, y) \cdot e^{iz\beta_{m,N}^3}, \\ M_{m,N}^{(4)}(x, y, z) &= [\sin(m\varphi)e_x - \cos(m\varphi)e_y] \cdot F_{m,N}(x, y) \cdot e^{iz\beta_{m,N}^4}. \end{aligned}$$

Здесь e_x, e_y – собственные вектора, $\varphi = \arctg(x/y)$, $F_{m,N}(x, y)$ функции Бесселя, $\beta_{m,N}^k$ постоянные распространения, определяющие скорость распространения мод. Набор поляризационных мод определяет набор орбитальных моментов, значение которых лежит в интервале $-m \dots +m$ и может пробегать $2m+1$ значений.

В общем виде разложение электрической составляющей светового поля, распространяющегося в оптическом волокне, можно представить в виде суперпозиции поляризационных мод:

$$E(x, y) = \sum_{k=1}^4 \sum_m \sum_N C_{m,N}^k M_{m,N}^k(x, y),$$

где $C_{m,N}^k$ – комплексные коэффициенты при различных поляризационных

модах, дающая каждая свой вклад в суммарное световое поле. Задача определения модового состава излучения сводится к поиску коэффициентов $C_{m,N}^k$. Для удобства перейдем к сквозной нумерации мод вместо индексов k, m, N введем индексы $i, j = 0 \dots (L-1)$, где $(L-1)$ полное количество мод, распространяющихся в оптическом волокне, и составим систему линейных уравнений, состоящую из $(L-1)$ уравнений:

$$\iint E(x, y) \cdot M_j^*(x, y) dx dy = \sum_{i=0}^{L-1} C_i \iint M_i(x, y) M_j^*(x, y) dx dy.$$

Для расчета комплексных коэффициентов C_i была написана программа в пакете MatLab. Для проверки правильности работы модели определения модового состава излучения была проведена серия расчетов с теоретически заданным распределением поля. Генерировался случайно заданный модовый состав излучения $E(x, y)$. Данное распределение поля $E(x, y)$ раскладывалось на неортогональные моды $M_i(x, y)$, представленные в формуле (1), на основе решения системы линейных уравнений (3), рассчитывались комплексные коэффициенты $C_i = C_a^\pm \cdot \exp(iC_\varphi^\pm)$, здесь C_a^\pm – амплитудные коэффициенты, C_φ^\pm – фазовые коэффициенты. Проверка осуществлялась сравнением рассчитанных комплексных коэффициентов C_i с заданными изначально. Результаты одного из тестовых расчетов для волокна с показателем преломления сердцевин $n_{co} = 1,47$, числовой апертурой $N_a = 0,11$, радиусом сердцевины волокна $r = 6$ мкм, длиной волокна $z_l = 20$ см на длине волны света $\lambda = 0,63$ мкм представлены в таблице 1. В оптическом волокне с данными параметрами и для данной длины волны света распространяются семь поляризационных мод $M_i(x, y)$ амплитудные C_a^\pm и

фазовые коэффициенты C_{φ}^{\pm} мод $\mathbf{M}_{m,N}$ представлены в табл. 1.

Заданные (б) и рассчитанные (а) амплитудные коэффициенты C_a^+ , C_a^- и фазовые коэффициенты C_{φ}^+ , C_{φ}^- , для каждой из пар m, N

m	N	C_a^+		C_{φ}^+		C_a^-		C_{φ}^-	
		а	б	а	б	а	б	а	б
0	1	0,14	0,27	2,69	2,79	0,14	0,03	2,07	1,02
0	2	0,23	0,04	3,10	-2,22	0,23	0,43	0,83	0,74
1	1	0,09	0,09	-1,82	-1,82	0,38	0,38	3,13	3,13
1	2	0,82	0,82	-1,54	-1,54	0,76	0,76	-0,25	-0,25
2	1	0,69	0,69	1,73	1,73	0,79	0,79	2,13	2,13
3	1	0,31	0,31	-2,01	-2,01	0,18	0,18	-2,6	-2,6
4	1	0,95	0,95	-2,16	-2,16	0,48	0,48	1,4	1,4

В результате тестирования обнаружено, что для $m > 0$ погрешность определения коэффициентов составляет 0,001%, однако для $m = 0$ коэффициенты находились с погрешностью 16% для амплитудных значений и 18% для фазовых. Данные результаты можно объяснить тем, что для $m = 0$ распределение поля является осе симметричным и находятся несколько наборов модовых коэффициентов, удовлетворяющих условию задачи. Таким образом, неоднозначность решения задачи для $m = 0$ не является критичной, так как любой из найденных решений для $m = 0$ является удовлетворяющим. Полученные распределения полей с рассчитанными коэффициентами полностью идентичны распределению полей с заданными коэффициентами (рис.1), среднеквадратичное отклонение распределений поля порядка 10^{-12} . Таким образом, была решена задача определения модового состава излучения по теоретическому распределению поля на выходе из волокна, в основе которого лежит разложение по неортогональным модам. Точность метода составила 0,001%. Данный метод показал хорошую точность для различных многомодовых волокон, в частности и для многомодового волокна с показателем преломления сердцевин $n_{co} = 1,47$ числовой апертурой $N_a = 0,11$, радиусом сердцевины волокна 15 мкм, длиной волокна $z_l = 23$ см на длине волны света $\lambda = 0,63$ мкм с 34 поляризационными

модами.

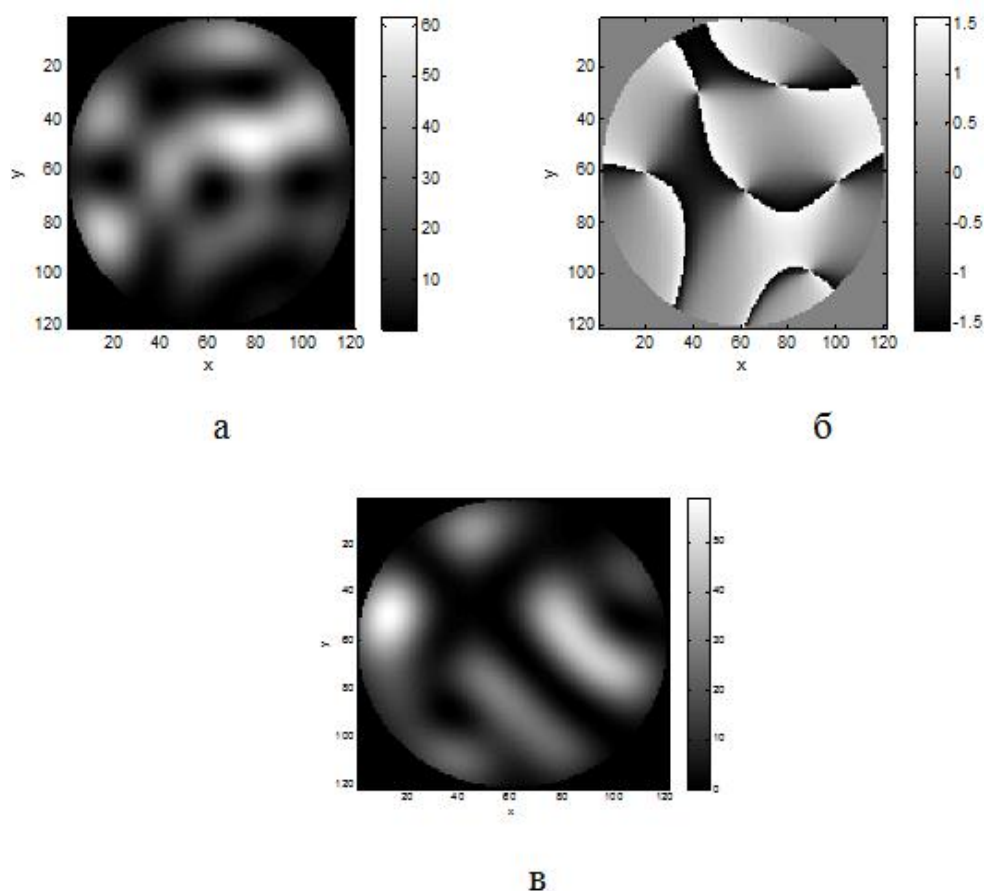


Рис. 1

Распределение интенсивности (а) и фазы (б) с рассчитанными коэффициентами на выходном торце волокна, распределение интенсивности на входном торце волокна (в).

Таким образом, предложен и теоретически реализован метод, позволяющий определить модовый состав излучения, распространяющегося в многомодовом оптическом волокне, по известному распределению поля на выходном торце волокна, полученная точность определения комплексных коэффициентов поляризационных мод составила 0,001%, определен вклад каждой поляризационной моды, несущей свой орбитальный момент, в суммарное световое поле. Данный метод является универсальным, подходит для любого количества мод, распространяющихся в многомодовом оптическом волокне.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Министерства образования и науки Российской Федерации (888/2014

102–Г3).

Список литературы

1. Saffman, M. Mode multiplexing and holographic demultiplexing communication channels on a multimode fiber / M. Saffman, D.Z. Anderson // Optics Letters. – 1991. – V. 16, № 5. – P. 300–302.
2. Stuart, H.R. Dispersive multiplexing in multimode optical fiber / H.R Stuart // Science. – 2000. – V. 289, № 5477. – P.281–283.
3. Tai, A.M. Transmission of two–dimensional images though a single fiber by wavelength–time encoding / A.M. Tai, A.A. Friesem // Optics Letters. – 1983. – V. 8, № 1. – P.57–59.
4. Kag Hwang In, Hyun Yun Seok and Yoon Kim Byoung Long–period fiber gratings based on periodic microbends // Opt. Lett. 1999. Vol. 24(18). P. 1263–1265.
5. Thornburg W.Q., Corrado B.J. and Zhu X. D. Selective launching of higher–order modes into an optical fiber with an optical phase shifter // Opt. Lett. 1994. Vol. 19(7). P. 454–456.
6. Карпеев С.В., Павельев В.С., Дюпарре М., Людге Б., Рокштул К., Шротер З. Анализ и формирование поперечно–модового состава когерентного излучения в волоконном световоде со ступенчатым профилем показателя преломления при помощи ДОО // Компьютерная оптика, 2002. В. 23. С. 4–9.
7. E. Nagali, F. Sciarrino. Manipulation of Photonic Orbital Angular Momentum for Quantum Information Processing // Advanced Photonic Sciences, 2012. Vol. 4(1). P.75–103.
8. M. Bolshakov, A. Ershov, N. Kundikova, «Optical effects connected with coherent polarized light propagation through a step–index fiber,» Fiber Optic Sensors, P.249–275 (2012).
9. Shapira, O. Complete modal decomposition for optical waveguides / O. Shapira, A.F. Abouraddy, J.D. Joannopoulos, Y. Fink // Physical Review Letters. – 2005. – V. 94, № 14. – P. 143902.
10. Huo, Y. Analysis of transverse mode competition and selection in multicore fiber lasers / Y. Huo, P.K. Cheo // Josa B. – 2005. – V. 22, № 11. – P. 2345–2349.

11. Yoon, Ch. Experimental measurement of the number of modes for a multi-mode optical fiber / Ch. Yoon, Y. Choi, M. Kim, J. Moon, D. Kim, W. Choi // Optics Letters. – 2012. – V. 37, № 21. – P. 4558–4560.

12. М.В. Большаков, М.А. Комарова, Н.Д. Кундикова. Определение модового состава излучения, распространяющегося в маломодовом оптическом волокне. Вестник ЮУрГУ, серия «Математика. Механика. Физика», выпуск 7, №34, стр. 132–135, 2012.

13. М.В. Большаков, М.А. Комарова, Н.Д. Кундикова. Генетический алгоритм для определения модового состава излучения в маломодовых оптических волокнах. Сборник трудов VII международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики 2012», стр. 217–219, 2012.

14. М.В. Большаков, М.А. Комарова, Н.Д. Кундикова. Экспериментальное определение модового состава излучения, распространяющегося в многомодовом оптическом волокне // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2013. – Т. 5, № 2. – С. 138–142.