

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 торец 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 широкополосности. 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 $V=5$. Основной недостаток 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 сердцевины $n_{co} = 1,47$, 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 оси 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 сердцевины $n_{co} = 1,47$ 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.

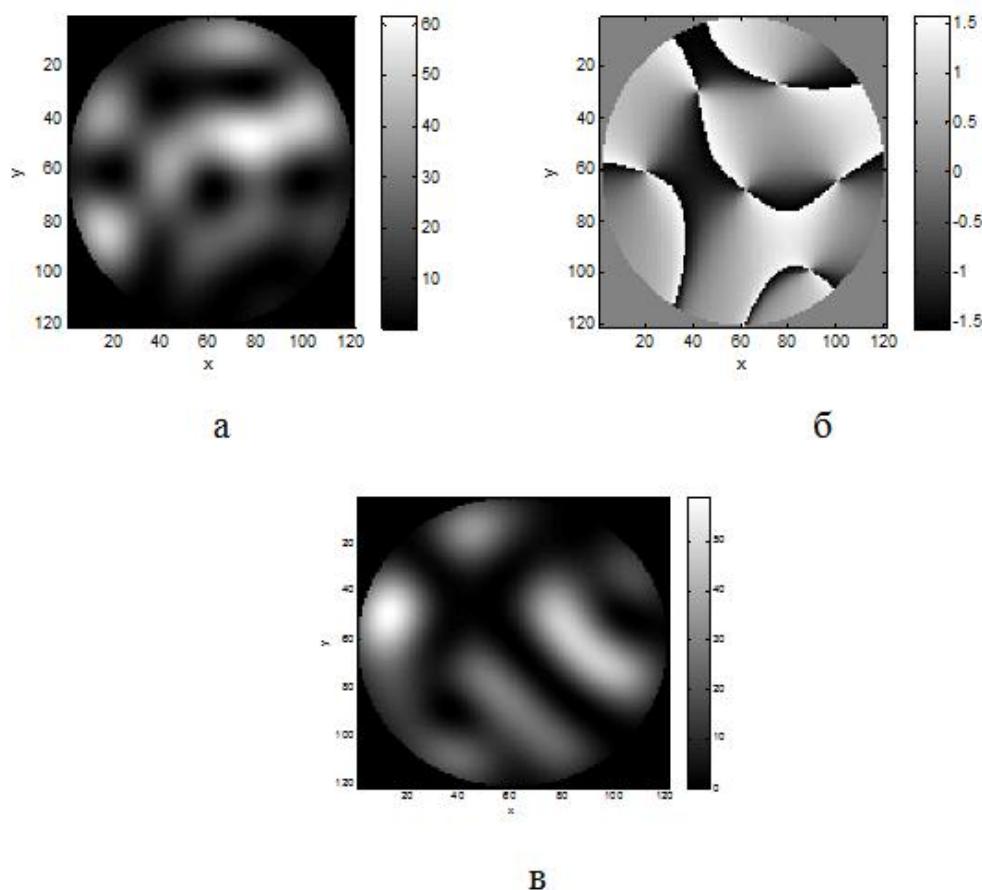


Рис. 1

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. Карпееv 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 ДОЭ // 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.