

ИССЛЕДОВАНИЕ НАБОРА МОД В СЛАБОНАПРАВЛЯЮЩИХ ВОЛОКНАХ

А.В. Александрова

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В работе рассматривается задача исследования набора мод в слабонаправляющих волокнах. Выполнен расчет собственных мод оптического волокна со ступенчатым показателем преломления двумя способами. По заданным физическим характеристикам определено множество суперпозиций мод, обладающих различными свойствами самовоспроизведения. Путем компьютерного моделирования с помощью коммерческого пакета BeamProp проведено исследование прохождения световых сигналов в неидеальных оптических волноводах.

Оптическое волокно в настоящее время считается самой совершенной и перспективной физической средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния. Оптические волокна имеют широкое применение в информационно-измерительной технике и телекоммуникациях, благодаря ряду особенностей, присущих оптическим волноводам.

Успехи, достигнутые в производстве оптических волокон, позволяют передавать информацию с большими скоростями на расстоянии в сотни километров без регенерации сигнала. Высокая помехозащищенность, безопасность передаваемой информации и электромагнитная совместимость каналов связи являются серьезными аргументами в пользу волоконно-оптических систем.

Существует два типа оптических волокон: одномодовые и многомодовые. Использование волокон с различным профилем показателя преломления по сечению (ступенчатым или градиентным) зависит от области применения. В ступенчатых волокнах показатель профиля преломления от оболочки к сердцевине изменяется скачкообразно. В градиентных волокнах показатель преломления сердцевины плавно возрастает от края к центру. В данной работе рассматриваются волокна со ступенчатым профилем показателя преломления из-за их широкого распространения.

Для многомодовых оптических волокон существует термин «модовое уплотнение каналов» – mode division multiplexing (MDM), который используется для методов уплотнения каналов передачи информации. В MDM каждая распространяющаяся в волокне пространственная мода рассматривается как отдельный канал, несущий свой сигнал [1,2]. Суть модового уплотнения каналов состоит в том, чтобы с помощью лазерных пучков, являющихся линейной суперпозицией распространяющихся в волноводе мод можно формировать сигналы, которые будут эффективно передавать информацию в одном физическом носителе – многомодовом волокне. Передаваемая информация может содержаться как в модовом составе, так и в доле энергии, которую несет каждая мода лазерного пучка [3-13]. Причем особенно перспективным представляется уплотнение по вихревому базису, связанному с орбитальным угловым моментом [7-13].

Вихревые лазерные пучки в последние десятилетия настолько успешно применялись в различных областях, что даже появился новый раздел в оптике – сингулярная оптика [14, 15]. С точки зрения квантового подхода вихревые моды характеризуется собственным спин-орбитальным состоянием, что позволяет без дополнительного поляризационного мультиплексирования многократно увеличить текущую скорость передачи по одному волокну.

В качестве устройств генерации и селекции вихревых мод наиболее перспективным является использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [8, 10, 16, 17]. Средства дифракционной оптики, в отличие от применяемых в настоящее время

технических решений, использующих асимметрию волокна или поляризационное разделение, реализовать общий случай модового мультиплексирования с заданным количеством модовых каналов.

Наиболее распространенные коммерческие волокна имеют разность показателей преломления сердцевины и оболочки $\Delta n = n_1 - n_2$ меньше 1%. Такие волокна называются слабонаправляющими и для них, можно существенно упростить выражения для распространяющегося электромагнитного поля, полагая $n_1 \cong n_2$. Тогда, более чем одна мода имеет одинаковое собственное значение (и скорость распространения). Причем, возможно составить линейную комбинацию гибридных мод, которая имеет линейную поляризацию (*LP*-моды) и является преимущественно поперечной.

Целью исследования является моделирование распространения в идеальном оптическом волокне суперпозиции линейно-поляризованных мод и определение по заданным физическим характеристикам ступенчатого оптического волокна весь возможный набор мод и множество суперпозиций этих мод, обладающих теми или иными свойствами самовоспроизведения. А также исследование прохождения световых сигналов в неидеальных оптических волноводах путем компьютерного моделирования с помощью коммерческого пакета BeamProp от компании RSoft DesignGroup, Inc., в котором реализован метод распространяющихся пучков (beam propagation method, BPM).

Для исследования набора мод слабонаправляющих волокон было рассмотрено цилиндрическое оптическое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления, которое имеет радиус сердцевины a , радиус оболочки b и показатели преломления n_1 и n_2 , соответственно (рис. 1). Электромагнитное поле, распространяющееся в таком волноводе удобно описывать с помощью функций Бесселя [18-20].

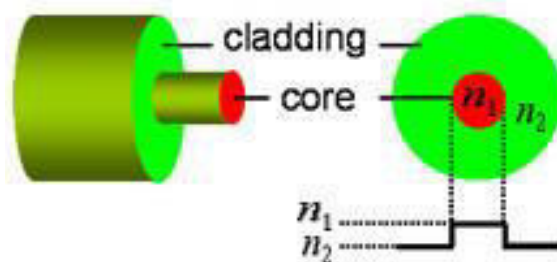


Рисунок 1 – Геометрия круглого ступенчатого волокна

Для слабонаправляющих волокон применима аппроксимация *LP*-мод:

$$LP_{pq}(r, \varphi) = \begin{cases} \cos(p\varphi) \\ \sin(p\varphi) \end{cases} \begin{cases} \frac{J_p(u_{pq}r/a)}{J_p(u_{pq})}, & 0 \leq r \leq a \\ \frac{K_p(w_{pq}r/a)}{K_p(w_{pq})}, & a \leq r \leq b \end{cases}$$

где в (r, φ) – полярные поперечные координаты, $J_p(x)$ – функция Бесселя первого рода, $K_p(x)$ – модифицированная функция Бесселя, u_{mp} – корни характеристического уравнения:

$$\frac{uJ_m(u)}{J_{m+1}(u)} + \frac{wK_m(w)}{K_{m+1}(w)} = 0,$$

где $u^2 + w^2 = V^2$, $V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ – число отсечки, λ – длина волны в воздухе.

Число отсечки V , куда входят основные параметры волокна и лазерного излучения, определяет количество распространяющихся в волокне мод. Если $V \leq 2,4$, то волокно будет одномодовым. Так, стандартное ступенчатое оптическое волокно с параметрами $n_1=1,451$,

$n_2=1,446$, $a=4,9$ мкм, $b=62,5$ мкм будет одномодовым, если использовать излучение с длиной волны $\lambda=1,55$ мкм. Для меньших длин волн волокно становится многомодовым. Например, при $\lambda=0,633$ мкм и $V \approx 8,4398$ в волокне с приведенными выше параметрами кроме фундаментальной моды LP_{01} , будут распространяться также LP_{02} , LP_{03} , LP_{11} , LP_{12} , LP_{21} , LP_{41} . Вид некоторых из них приведен на рис. 2.

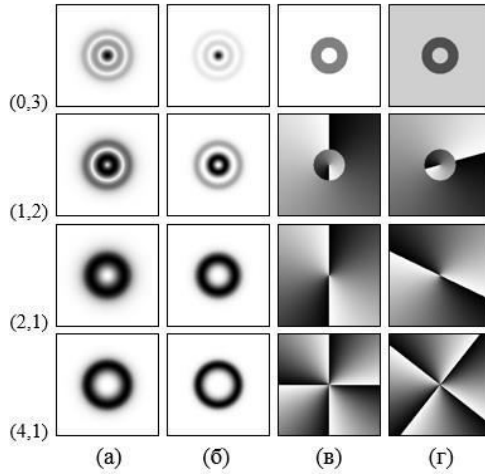


Рисунок 2 - Моды (p,q) : $(0,3)$, $(1,2)$, $(2,1)$, $(4,1)$: поперечное распределение (негатив) амплитуды (а), поперечное распределение (негатив) интенсивности (б); поперечное распределение фазы (белый цвет соответствует значению фазы 0, а черный – 2π) в плоскостях $z=0$ (в) и $z=100$ мкм (г).

Для описания распространения некоторой линейной суперпозиции LP-мод в идеальном ступенчатом оптическом волокне применима следующая формула:

$$U_0(r, \varphi) = \sum_{p,q \in \Omega} C_{pq} \Psi_{pq}(r, \varphi),$$

где C_{pq} – комплексные коэффициенты, $\Psi_{pq}(r, \varphi)$ – моды при $z=0$, угловая часть которых без потери общности представлена в несколько другом виде:

$$\Psi_{pq}(r, \varphi, z) = \exp(-i\beta_{pq}z) T_p(\varphi) R_{pq}(r) = \exp(-i\beta_{pq}z) \exp(ip\varphi) \begin{cases} \frac{J_p(u_{pq}r/a)}{J_p(u_{pq})}, & 0 \leq r \leq a \\ \frac{K_p(w_{pq}r/a)}{K_p(w_{pq})}, & a \leq r \leq b \end{cases}.$$

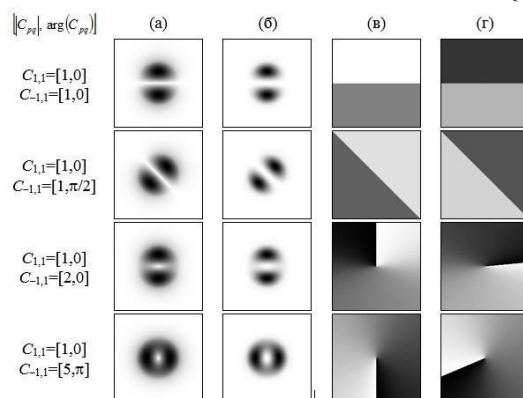


Рисунок 3 - Суперпозиция мод (p,q) : $(1,1)+(-1,1)$ с различными комплексными коэффициентами: поперечное распределение амплитуды (а), интенсивности (б) и фазы (в) в плоскости $z=0$, а также распределение фазы на расстоянии $z=200$ м (д).

В ходе работы была рассмотрена основная теория многомодовых оптических волокон, приведено подробное описание применений уравнений Максвелла к цилиндрической среде со ступенчатым профилем показателя преломления. С использованием программного обеспечения MATLAB выполнен расчет собственных мод оптического волокна со ступенчатым показателем преломления двумя способами.

Особое внимание было уделено свойствам линейно-поляризованных мод ступенчатого волокна. Проведено моделирование распространения в оптическом волокне суперпозиции линейно-поляризованных мод с различными константами распространения и вихревыми фазовыми составляющими. Выполнено исследование основных свойств самовоспроизведения суперпозиций линейно-поляризованных мод идеального оптического волокна, таких как структурная стабильность, периодическое повторение и вращение поперечной картины [21].

Для того, чтобы исследовать неидеальные оптические волноводы, проанализировать и сравнить с полученными ранее результатами, в программном пакете BeamProp были созданы модели оптических волокон с различными параметрами (рис. 4), структурами и формами, изучены их свойства и характеристики. Основной характеристикой оптического волокна является набор распространяющихся в нем мод (рис. 5).

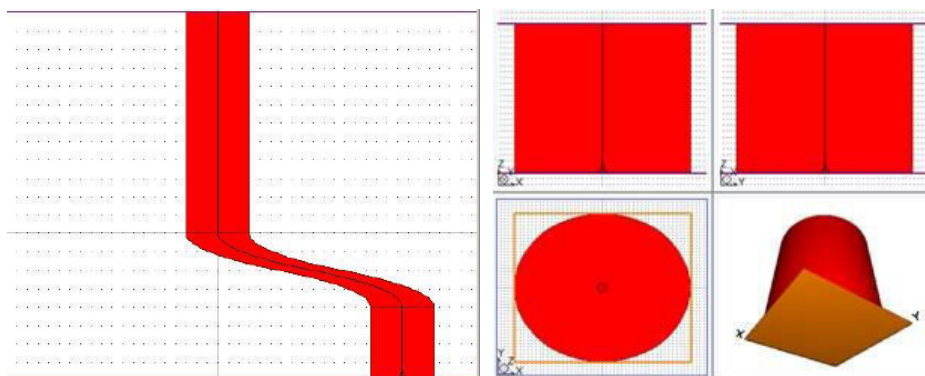


Рисунок 4 – Различные модели волноводов

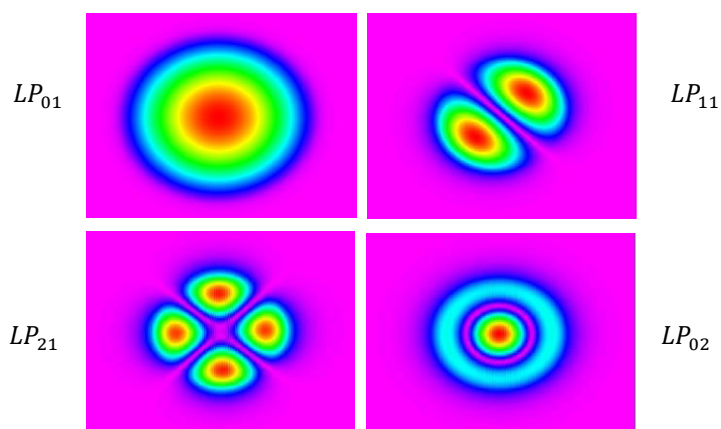


Рисунок 5- Моды, полученные в программе BeamProp

Таким образом, с помощью программы BeamProp можно исследовать различные образцы неидеальных оптических волокон, как со ступенчатым профилем показателя преломления, так и с задаваемым. Можно учесть следующие характеристики:

- профиль и показатель преломления оболочки;
- разницу показателей преломления;
- длину волновода;
- вид функции, по которой изменяется показатель преломления;
- и др. данные.

Особый интерес представляет изучение устойчивости вихревых мод к изгибам волокна при различных характеристиках сердцевины и оболочки оптического волокна.

Литература

1. Berdague S., Facq P., Mode division multiplexing in optical fibers // Appl. Optics. 1982. V.21. P. 1950-1955.

2. Levi L., Applied optics // John Wiley & Sons Inc., New York. 1980. P. 55.
3. A. Al Amin, A. Li, S. Chen, X. Chen, G. Gao and W. Shieh, LP11 mode 4×4 MIMO-OFDM transmission over a two-mode fiber // Opt. Express. Vol. 19, Issue 17. 2011. P. 16672-16679.
4. Randel, S., 6×56-Gb/s mode-division multiplexed transmission over 33-km few-mode fiber enabled by 6×6 MIMO equalization // Optics Express. Vol. 19, Issue 17. 2011. P. 16697-16707.
5. N. Hanzawa, K. Saitoh, T. Sakamoto, T. Matsui, S. Tomita, M. Koshiba, Demonstration of mode-division multiplexing transmission over 10 km two-mode fiber with mode coupler // Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2011.
6. Xi Chen, Jia Ye, Yue Xiao, An Li, Jiayuan He, Qian Hu, William Shieh, Equalization of two-mode fiber based MIMO signals with larger receiver sets // Optics Express. Vol. 20, Issue 26. 2012. P. B413-B418.
7. Z. Wang, N. Zhang, X.-C. Yuan. High-volume optical vortex multiplexing and de-multiplexing for free-space optical communication // Optics Express. 2011 V. 19. Issue. P. 482-492.
8. Khonina, S.N. Optical Vortices in a Fiber: Mode Division Multiplexing and Multimode Self-Imaging / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy and V.A. Soifer // Recent Progress in Optical Fiber Research; ed. by Dr Moh. Yasin. – InTech, 2012.
9. J. Sakaguchi, Space Division Multiplexed Transmission of 109-Tb/s Data Signals Using Homogeneous Seven-Core Fiber // J. of Lightw. Technol. Vol. 30, Issue 4. 2012. P. 658-665.
10. Kirilenko M.S., Khonina S. N., Information Transmission Using Optical Vortices // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 22(2). 2013. P. 81–89 (2013).
11. N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A.E. Willner, S. Ramachandran, Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers // Science Vol. 340, N 6140. 2013. P. 1545-1548.
12. H. Huang, G. Xie, Y. Yan, N. Ahmed, Y. Ren, Y. Yue, D. Rogawski, M.J. Willner, B.I. Erkmen, K.M. Birnbaum, S.J. Dolinar, M.P.J. Lavery, M.J. Padgett, M. Tur, and A.E. Willner, 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength // Optics Letters, Vol. 39, No. 2. 2014. P. 197-200.
13. A. E. Willner. Optical communications using orbital angular momentum beams // Advances in Optics and Photonics. 2015. 7(1). P. 6–106.
14. M. S. Soskin and M. V. Vasnetsov, Singular Optics // Progress in Optics 42. 2001. P. 219-276.
15. M. J. Padgett, J. Courtial, and L. Allen, Light's Orbital Angular Momentum // Phys. Today, 57. 2004. P. 35-40.
16. Хонина С.Н., Скиданов Р.В., Котляр В.В., Соيفер В.А., Фазовый дифракционный фильтр, предназначенный для анализа световых полей на выходе волокна со ступенчатым профилем показателя преломления // Компьютерная оптика, 25. 2003. С. 89-94.
17. Хонина С.Н., Карпеев С.В., Возбуждение и обнаружение угловых гармоник в волоконном световоде при помощи ДОЭ // Компьютерная оптика, 26. 2004. С. 16-26.
18. Koshiba M., Optical waveguide analysis // McGraw-Hill Inc., New York, 1948.
19. Snyder A.W. and Love J.D. Optical waveguide theory // Chapman and Hall, London, 1983.
20. Cherin A.H. An introduction to optical fiber // McGraw-Hill, Singapore, 1987.
21. Khonina S.N., Volotovskiy S.G. Self-reproduction of multimode laser fields in weakly guiding stepped-index fibers // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics), Allerton Press. 2007. 16(3).P.167-177.