

УДК 535

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ДЕМУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ ПО ДЛИНАМ ВОЛН, ПОСЛЕ
ПРОХОЖДЕНИЯ ВОЛОКНА С $V = 3.8$, УПЛОТНЕННОГО ВИХРЕВЫМИ
ПУЧКАМИ С $l = \pm 1$ И $s = \pm 1$**

Халилов С. И.^{*}, Ильясова А. А., Рыбась А. Ф.

*Физико-технический институт, Крымский федеральный университет имени
В. И. Вернадского, Симферополь 295007, Россия*

**E-mail: server.khalilov.94@mail.ru*

Мы показали возможность увеличения количества информационных каналов в волоконно-оптической линии связи, используя вихревые пучки с топологическими зарядами $l = \pm 1$, состоянием поляризации $s = \pm 1$ и двумя длинами волн. А также с помощью тонкой структуры поля волокна, идентифицировали каждый из входных пучков по состоянию поляризации и топологическому заряду, после прохождения волокна.

Ключевые слова: орбитальный угловой момент, оптический вихрь, топологический заряд, сингулярность.

PACS: 42.81.Uv

ВВЕДЕНИЕ

Скорость передачи данных по волоконно-оптическим линиям связи приближается к максимально возможным для традиционных методов мультиплексирования сигнала в ВОЛС [1–5].

Орбитальный угловой момент (ОУМ) вихревого пучка, который в поперечном сечении имеет спиральную фазовую структуру $\exp(il\varphi)$, где φ – поперечный азимутальный угол, l – величина ОУМ вихревого пучка, которая теоретически не ограничена и дает новую степень свободы в увеличении количества каналов в волокне (ОУМ относится к пространственной фазе пучка, а не к состоянию поляризации, который связан со спиновой компонентой пучка). Вихревые пучки с различными величинами ОУМ взаимно ортогональны, что позволяет мультиплексировать и демультиплексировать их по величинам ОУМ, с низким уровнем перекрестных помех.

Предложенная нами экспериментальная схема, позволяет: мультиплексировать и демультиплексировать сложный сигнал в оптическом маломодовом волокне. Также анализировать поле на выходе из маломодового волокна методом Стокс-поляриметрии, для различных комбинаций складываемых сигналов в зависимости от знаков и величин топологических зарядов оптических вихрей и направленности циркулярно-поляризованных компонент.

1. МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования процесса демультимплексирования вихревого сигнала после маломодового волокна по длинам волн, использовалась установка Рис. 1.

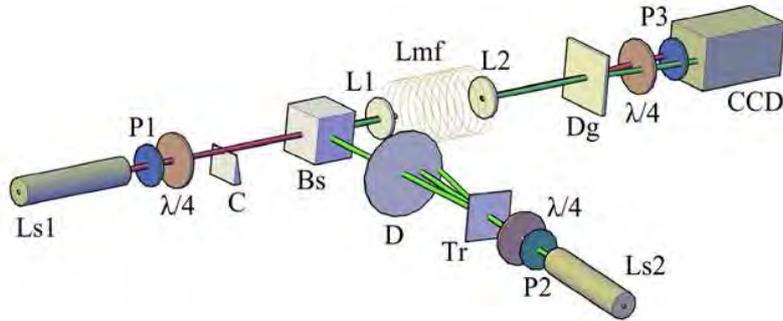


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: (Ls_1, Ls_2) – источник света, (P) – поляризатор, ($\lambda/4$) – четверть-волновая пластинка, (C) – покровное стекло, (Tr) – фазовый транспарант, (D) – диафрагма, (Bs) – делительный кубик, (L) – микробъектив, (Fmf) – маломодовое оптическое волокно, (Dg) – дифракционная решетка, (CCD) – камера

Источник света Ls_1 с длиной волны $\lambda_1 = 0.6328$ мкм, имеющий правую компоненту поляризации $s = +1$, проходя через покровное стекло C [6], дифрагирует, образуя «цепочку», состоящую из оптических вихрей. Регулируя диаметром пучка, можно выделить единственный оптический вихрь с топологическим зарядом $l = +1$ (Рис. 1 а, б). Далее источником света Ls_2 с длиной волны $\lambda_2 = 0.5328$ мкм, имеющий левую компоненту поляризации $s = -1$, проходя через фазовый транспарант, дифрагирует, образуя угловой спектр, состоящий из оптических вихрей.

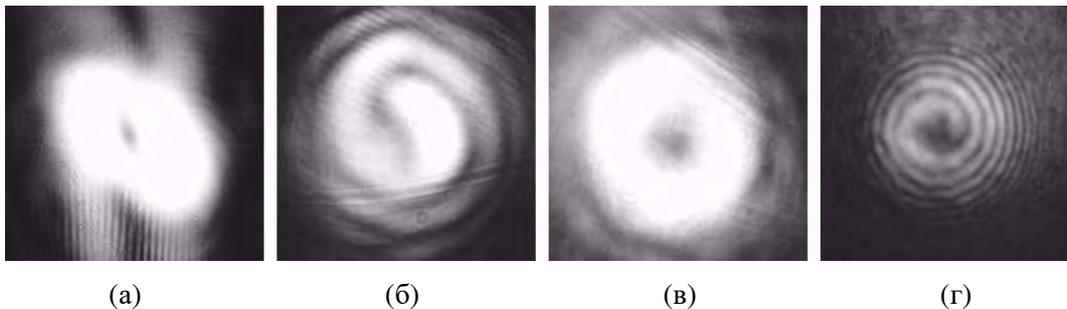


Рис. 2. (а), (в) распределение интенсивности; (б), (г) интерферограмма оптического вихря с Гауссовым полем. (а), (б) оптический вихрь, полученный на покровном стекле с топологическим зарядом $l = +1$; (в), (г) оптический вихрь, полученный с помощью фазового транспаранта, с топологическим зарядом $l = -1$

С помощью диафрагмы D выделяем вихрь, с топологическим зарядом $l = -1$ (Рис. 2 б, в). Далее, два вихревых пучка мультиплексируем на делительном кубике Bs и с помощью линзы L , соосно проецируем в торец маломодового оптического волокна Fmf .

В эксперименте использовалось изотропное волокно с градиентным показателем преломления, имеющий круглую сердцевину. Волноводный параметр V такого волокна, для излучения с длиной волны $\lambda_1 = 0.6328$ мкм составил $V_1 = 3.8$, а для $\lambda_2 = 0.5328$ мкм – $V_2 = 4.37$. При таких двух значений волноводного параметра, в волокне реализуется двенадцатимодовый режим [7–9]. Для фильтрации не вихревых модовых комбинаций оптическое волокно заранее навивалось на кварцевую трубку. Из-за геометрической формы спирали не вихревые моды, в частности фундаментальная мода, смещаются с сердцевины к периферии волокна, формируя в сердцевине вихревые комбинации [10–13].

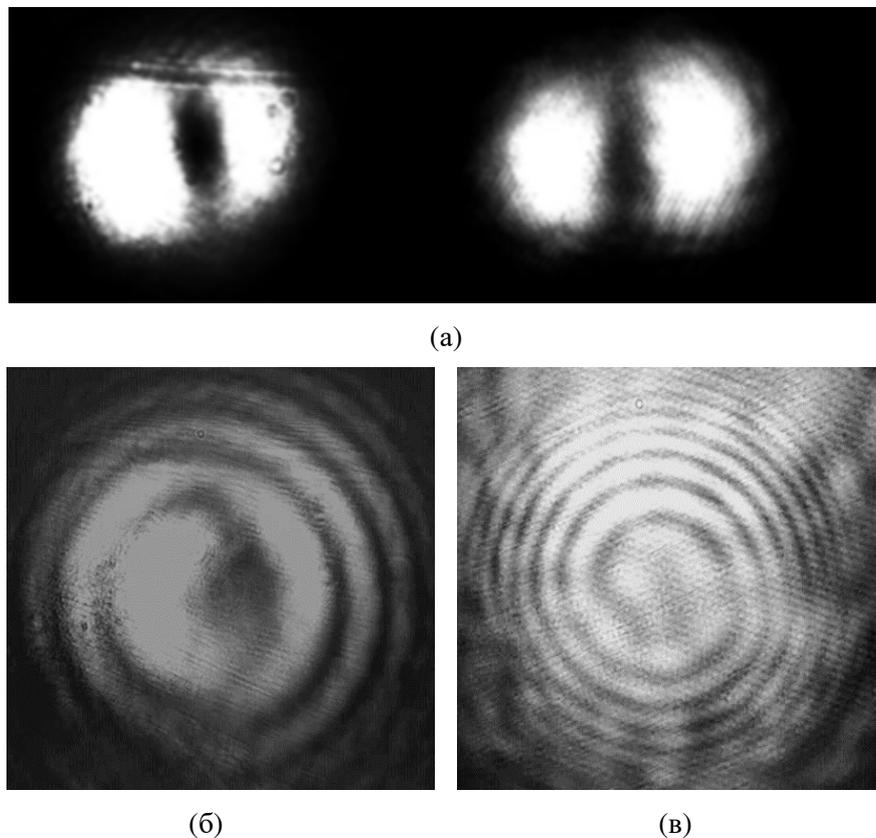
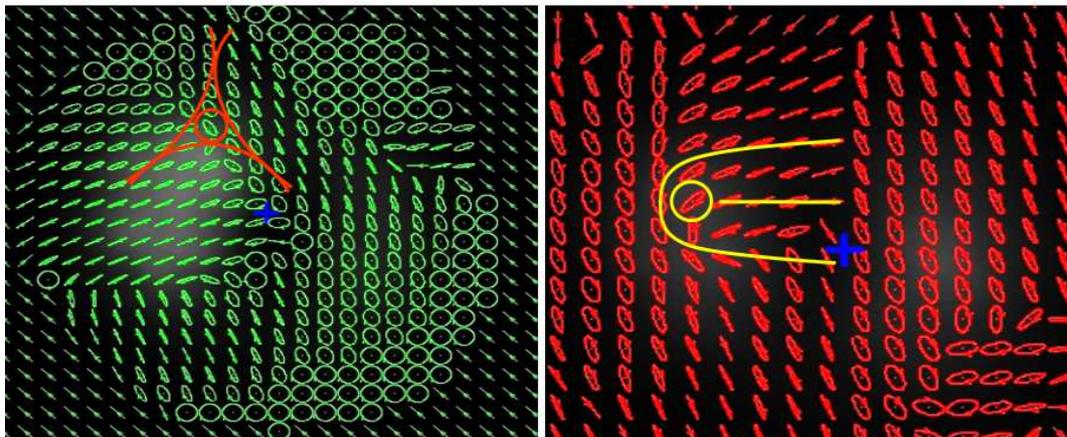


Рис. 3. (а) распределение интенсивности поля волокна после демуплексирования по длинам волн (слева для $\lambda_2 = 0.5328$ мкм, справа для $\lambda_1 = 0.6328$ мкм); (б), (в) интерферограмма соответствующих полей волокна с Гауссовым полем

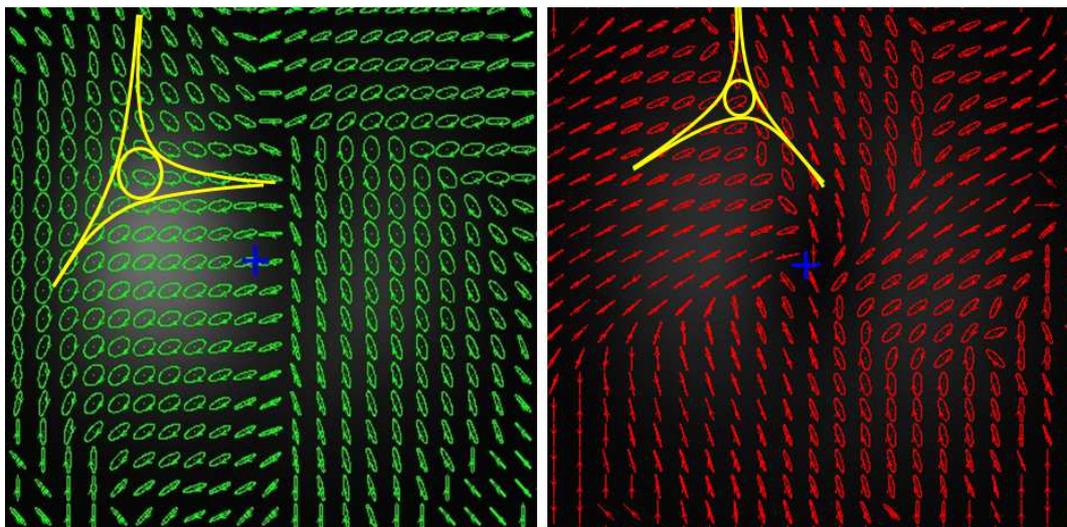
После прохождения волокна, поле излучения с помощью дифракционной решетки Dg , разделяется на два канала с различными длинами волн и результат фиксирует CCD камера Рис. 3 (а).

Для измерения величины топологического заряда, дополнительно был собран интерферометр Маха-Цендера. Как видно из интерферограмм, величина и знак топологического заряда поля волокна Рис. 3 (б), (в), совпадает с величиной и знаком топологического заряда входного пучка Рис. 2 (б), (г).



(а) $\lambda_2 = 0.5328$ мкм., $s = -1$, $l = -1$

$\lambda_1 = 0.6328$ мкм., $s = +1$, $l = +1$



(б) $\lambda_2 = 0.5328$ мкм., $s = +1$, $l = -1$

$\lambda_1 = 0.6328$ мкм., $s = +1$, $l = -1$

Рис. 4. Векторная карта распределения поляризации поля волокна, после демультимплексирования по длинам волн: (а) первый и (б) второй эксперимент с различными входными параметрами пучка

Далее для идентификации каждого из пучков поля волокна по величинам топологического заряда и состояния поляризации, строим векторную карту поляризации методом Стокс-поляриметрии [14].

Как видно из тонкой структуры поля волокна после разделения по длинам волн Рис. 4: поляризационная сингулярность типа «лимон» присутствует у входного пучка с величиной топологического заряда $l = +1$, а сингулярность типа «звезда» присутствует у пучков с величиной топологического заряда $l = -1$, а знак этих С-точек указывает на состояние поляризации входного пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами экспериментально была продемонстрирована возможность мультиплексирования и после прохождения маломодового волокна – демультимплексирования по длинам волн циркулярно поляризованных вихревых пучков с величиной топологического заряда $l = \pm 1$. Методом Стокс-поляриметрии проведен анализ тонкой поляризационной структуры поля волокна. Показана возможность идентификации каждого из входных сигналов по длинам волн и орбитальным угловым моментам. Обнаружено, что в поле излучения на выходе из маломодового оптического волокна имеется С-точка, характеризующая знак циркулярной поляризации входного пучка. Также, величина топологического заряда исходного пучка, попавшего на входной торец волокна, соответствует С-точки топологического индекса.

Как было показано, данная методика поддерживает технологию спектрального WDM уплотнения и позволяет увеличить количество каналов в нынешней волоконно-оптической линии связи минимум в 4 раза.

Список литературы

1. Willner A., Wang J. and Huang H. A different angle on light communications / *Science*. 2012. Vol. 337. P. 655.
2. 12-core fiber with one ring structure for extremely large capacity transmission / S. Matsuo, Y. Sasaki, T. Akamatsu, I. Ishida, K. Takenaga, K. Okuyama, K. Saitoh, M. Kosihba // *Opt. Express*. 2012. Vol. 20. P. 28398.
3. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers / N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. Willner, S. Ramachandran // *Science*. 2013. Vol. 340. P. 1545.
4. Richardson D., Fini J. and Nelson L. Space-division multiplexing in optical fibres // *Nat. Photonics*. 2013. Vol. 7. P. 354.
5. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing / J. Wang, J. Yang, I. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, A. Willner // *Nat. Photonics*. 2012. Vol. 6. P. 488.
6. Izdebskaya Ya., Shvedov V., Volyar A. Singular Beam Diffraction by the Edge of a Dielectric Medium // *Ukr. J. Phys. Opt.* 2004. Vol. 5, №3. P. 96.
7. Dislocation reactions and topological birefringence of degenerated combined fields of low-mode fiber / T. Fadeyeva, A. Volyar, V. Zhilaitis, M. Soskin // *Proc. of SPIE*. Vol. 3904. P. 112.
8. Combined optical vortices in low-mode optical fibers / T. Fadeyeva, A. Volyar, V. Zhilaitis, M. Soskin // *Proc. of SPIE*. Vol. 3904. P. 124.
9. Volyar A., Fadeyeva T., Shvedov V. Generic singular beams in an optical fiber and free space, its applications // *Proceedings of SPIE*. Vol. 4403. P. 153.
10. Alexeyev C. N., Lapin B. P., Yavorsky M. A. Optical vortices and topological phase in strongly anisotropic coiled few-mode optical fibers // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2007. Vol. 24. No. 10. P. 2666.

11. Alexeyev C. N., Lapin B. P., Yavorsky M. A. Optical Vortices and Topological Effects in Coiled Fibers with Combined Anisotropy // *Optics and Spectroscopy*. 2011. Vol. 110, No. 3. P. 456.
12. Alexeyev C. N., Yavorsky M. A. Propagation of Optical Vortices in Coiled Weakly Guiding Optical Fibers // *Optics and Spectroscopy*. 2007. Vol. 102, No. 5. P. 754.
13. Alexeyev C. N., Yavorsky M. A. Berry's phase for optical vortices in coiled optical fibres // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2006. Vol. 9 (1), P. 6.
14. Патент на полезную модель 168752 РФ, (51) МПК G01J 4/04 (2006.01). Устройство для определения и исследования распределения поляризации / А. Ф. Рыбась, А. О. Погребная; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского. № 2016131640; заявл. 01.08.2016; опубл. 17.02.2017, Бюл. № 5.

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROCESS OF DEMULTIPLEXING THE
WAVELENGTHS, AFTER PASSING THROUGH A FIBER WITH $V = 3.8$,
COMPACTED VORTEX BEAMS WITH $l = \pm 1$ AND $s = \pm 1$**

Halilov S. I. , Ilyasova A. A., Rubass A. F.*

Institute of Physics and Technology, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol 295007, Russia

*E-mail: server.khalilov.94@mail.ru

We have shown the possibility of increasing of the number of information channels in the fiber-optic communication line, using vortex beams with topological charges $l = \pm 1$, the state of polarization $s = \pm 1$ and two wavelengths. Also, using the fine structure of the field of fibers, each of the input beams was identified by polarization state and topological charge after passing through the fiber.

Keywords: optical angular momentum, optical vortex, topological charge, singulars.

References

1. A. Willner, J. Wang and H. Huang, *Science* **337**, 655–656 (2012).
2. S. Matsuo, Y. Sasaki, T. Akamatsu, I. Ishida, K. Takenaga, K. Okuyama, K. Saitoh and M. Koshiba M., *Opt. Express* **20**, 28398–28408 (2012).
3. N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. Willner and S. Ramachandran, *Science* **340**, 1545–1548 (2013).
4. D. Richardson, J. Fini, L. Nelson, *Nat. Photonics* **7**, 354–362 (2013).
5. J. Wang, J. Yang, I. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur and A. Willner, *Nat. Photonics* **6**, 488–496 (2012).
6. Ya. Izdebskaya, V. Shvedov, A. Volyar., *Ukr. J. Phys. Opt.* **5**, №3, 96–99 (2004).
7. T. Fadeyeva, A. Volyar, V. Zhilaitis, M. Soskin, *Proc. of SPIE* **3904**, 112–123 (1999).
8. T. Fadeyeva, A. Volyar, V. Zhilaitis, M. Soskin, *Proc. of SPIE* **3904**, 124–130 (1999).
9. A. Volyar, T. Fadeyeva, V. Shvedov, *Proc. of SPIE* **4403**, 153–161 (2001).
10. C. N. Alexeyev, B. P. Lapin, M. A. Yavorsky, *J. Opt. Soc. Am. B* **24**, No. 10 (2007).
11. C. N. Alexeyev, B. P. Lapin, M. A. Yavorsky, *Optics and Spectroscopy* **110**, No. 3, 456–463 (2011).
12. C. N. Alexeyev, M. A. Yavorsky, *Optics and Spectroscopy* **102**, No. 5, 754–759 (2007).
13. C. N. Alexeyev, M. A. Yavorsky, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* **9** (2007).
14. A. F. Rubass, A. O. Pogrebnya. RF Patent, No. 168752, Byull., No. 5 (2017).

*Поступила в редакцию 14.11.2017 г. Принята к публикации 22.12.2017 г.
Received November 14, 2017. Accepted for publication December 22, 2017*