

# Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 654.09  
DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.121-128

Дата поступления: 03.09.2019  
Дата принятия: 02.10.2019

## Использование бездисперсионных солитоноподобных оптоволоконных вихревых пучков для повышения эффективности RoF-систем

*И.Л. Виноградова, А.Р. Гизатулин, И.К. Мешков,  
Е.П. Грахова, В.Х. Багманов, А.Х. Султанов*

Уфимский государственный авиационный технический университет  
450008, Российская Федерация, г. Уфа  
ул. К. Маркса, 12

В данной статье рассматривается распространение солитоноподобных вихревых пучков в оптическом сегменте системы радио-по-волокну (Radio-over-Fiber, RoF). Подход основан на решении нелинейного уравнения Шредингера для керровской нелинейной среды, какой является оптическое волокно. В работе получено численное решение нелинейного уравнения Шредингера для вихревых солитонов; проведено моделирование распространения солитоноподобных вихрей по оптическому волокну. Кроме того, проведено моделирование фазового амплитудного фильтра, формирующего оптические сигналы с заданным состоянием орбитального углового момента и сохранением поляризации при распространении по оптическому волокну. Расчет амплитудно-фазового фильтра проводился на основе спинорного представления уравнений Максвелла.

*Ключевые слова:* RoF системы, W-диапазон, вихревые моды, солитоноподобные моды, фазово-амплитудный фильтр, бездисперсионное распространение.

### Введение

Технология Radio-over-Fiber (RoF) является эффективным методом передачи информации как по оптоволоконным линиям, так и по радиоканалам. С помощью данной технологии можно эффективно генерировать микроволновые сигналы для удаленных приемных и передающих устройств. Одним из современных направлений в развитии технологии RoF является разработка методов передачи информации в диапазоне 75–110 ГГц (W-диапазон) из-за его нелицензируемого использования и возможности организации сверхширокополосных (СШП) каналов связи [1; 2], которые необходимы для современных и будущих пользовательских и транспортных беспроводных приложений, таких как передача пользовательского трафика в сетях 5G и Wi-Fi, сбор данных о беспроводных устройствах для IoT, взаимодействие M2M, радиофотоника, беспроводная передача контента на мобильные устройства (8K UHD TV), сенсорика, туманные вычисления и т. д. Использование вихревых оптических пучков (переносящих орбитальный угловой момент – ОУМ) в RoF системах обеспечивает дополнительные преимущества, такие как возможность организации скрытых каналов связи в оптическом сегменте системы, возможность вторичного использования канала связи

✉ tks@ugatu.ac.ru (Султанов Альберт Ханович)

для передачи сигналов управления как активным, так и пассивным элементам сети, а также дополнительный метод мультиплексирования полезной информации в радиодиапазоне. Однако распространение вихревых пучков в оптическом волокне неизбежно сопряжено с разрушением структуры поля из-за различных искажений. Одним из возможных решений этой проблемы является использование так называемых солитоноподобных вихрей, которые не подвержены дисперсии и сохраняют свою пространственную структуру. Также необходимо отметить, что генерация вихревых пучков в оптическом волокне является достаточно нетривиальной задачей, требующей либо специальных волокон, либо средств free-space оптики. Для решения этой проблемы предлагается использовать рассчитанный с использованием гамильтонова подхода фазово-амплитудный фильтр, генерирующий вихри, сохраняющие поляризацию и угловой момент.

### 1. Моделирование распространения бездисперсионных солитоноподобных оптических вихрей

Как известно [3], солитоны в оптическом волокне формируются в нелинейном режиме при относительно больших мощностях (от десятков

милливатт при непрерывной накачке до сотен милливатт при импульсной накачке) оптического сигнала. Оптические солитоны можно разделить на пространственные и временные. Пространственные солитоны образуются за счет эффекта самофокусировки, который возникает из-за того, что показатель преломления увеличивается пропорционально интенсивности падающей электромагнитной волны по формуле [3]:  $\Delta n = n_2 |E|^2$ . Следовательно, наблюдается эффект линзы, который предотвращает дифракционную расходимость оптического луча. Временные солитоны образуются, например, при взаимной компенсации аномальной хроматической дисперсии и фазовой самомодуляции (ФСМ) или фазовой кросс модуляции (ФКМ). Такие солитоны не изменяются во времени и пространстве, т. е. они являются оптическими импульсами постоянной длительности и поперечного диаметра.

Основное уравнение, описывающее эволюцию электромагнитных волн в керровской нелинейной среде, такой как оптическое волокно, известно, как НУШ [3] и может быть записано в виде:

$$i \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + |u|^2 u = 0, \quad (1)$$

где  $x$  и  $y$  – нормированные поперечные направления [3];  $u = \sqrt{k_0 n_2 L_d} A$ ;  $k_0$  – волновое число;  $n_2$  – нелинейный параметр, определяющий отклонение показателя преломления;  $L_d = \beta_0 \xi_0^2$ ;  $\beta_0$  – постоянная распространения каждой моды;  $\xi_0$  – поперечный диаметр моды, а  $A$  – зависящая от координат огибающая оптического импульса, являющаяся искомым решением НУШ. Предполагается, что уравнение (1) имеет размерность (2+1) с двумя поперечными размерами и одним направлением распространения. Отметим, что НУШ в записи (1) не зависит от времени.

Используя преобразование Маделунга [3], можно показать, что искомая огибающая для вихревого солитона в оптическом волокне (а именно – темный солитон с осевой симметрией) может быть записана в виде (в цилиндрических координатах):

$$u(r, \varphi, z) = U(r) e^{im\varphi} f(z), \quad (2)$$

где радиальная часть  $U(r)$  будет определена далее;  $f(z)$  можно выбрать многими способами в зависимости от физических соображений, а фазовый член  $e^{im\varphi}$  описывает спиральность фазы порядка  $m$  (проекция углового момента на направление распространения), то есть показывает вихревую природу описанной солитоноподобной волны.

Отметим, что несолитонный вихрь должен иметь сингулярность интенсивности в центре распределения поля – солитоны с подобным свойством называются темными солитонами. Продольная часть  $f(z)$  решения (2) в этом случае может быть выбрана в виде экспоненциального члена  $e^{i\beta_m z}$ , где коэффициенты  $\beta_m$  должны быть определены при решении линейного характеристического уравнения для слабонаправляющего оптического волокна [4]:

$$\frac{J'_m(\vartheta)}{u J_m(\vartheta)} + \frac{K'_m(\varpi)}{\varpi K_m(\varpi)} = \pm m \left( \frac{1}{\vartheta^2} + \frac{1}{\varpi^2} \right), \quad (3)$$

где  $\vartheta = a \sqrt{(k_0 n_1)^2 - \beta^2}$  и  $\varpi = a \sqrt{\beta^2 - (k_0 n_2)^2}$ , а  $J_m(\vartheta)$  и  $K_m(\varpi)$  являются бесселевыми и модифицированными бесселевыми функциями порядка  $m$ , соответственно. Следовательно, выражение (2) можно переписать как

$$u(r, \varphi, z) = U(r) e^{im\varphi} e^{i\beta_m z}. \quad (4)$$

Радиальная функция  $U(r)$  удовлетворяет следующему уравнению:

$$\frac{d^2 U}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} - \frac{m^2}{r^2} U + 2(1 - U^2)U = 0, \quad (5)$$

не имеющему аналитического решения. Следовательно,  $U(r)$  можно определить только численными методами, решая задачу Коши с граничными условиями  $U(0) = U'(0) = 0$ ;  $U(\infty) = 1$  (в нормированных единицах). В данной статье мы рассмотрим маломодовые волокна FMF OFS [5], поддерживающие моды  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$ , т. е. вихрь первого порядка в линейном приближении. Отметим, что сами линейно-поляризованные моды не являются вихревыми; для формирования ОУМ-мод необходимо использовать суперпозицию  $LP_{11e} + iLP_{11o}$ , где  $i$  есть мнимая единица, а индексы  $e$  и  $o$  означают четную и нечетную моду, соответственно. Исходя из граничных условий, с помощью метода Рунге-Кутты 4-го и 5-го порядка (функция ode45 в пакете Matlab) мы получим следующие решения радиального распределения поля  $U(r)$  для порядка  $m = 1$  и  $m = 0$  с (рис. 1). На рис. 2 показано трехмерное изображение интенсивностей и фаз рассматриваемых пучков. Поскольку данное изображение было получено на основе численного решения (5), оно построено на основе конечного числа точек, поэтому выглядит несколько разорванным. Тем не менее, можно показать, что при использовании метода ode45 скалярное произведение мод  $m = 1$  и  $m = 0$  равно нулю. Суперпозиция этих мод представлена на рис. 3, из которого следует, что пат-

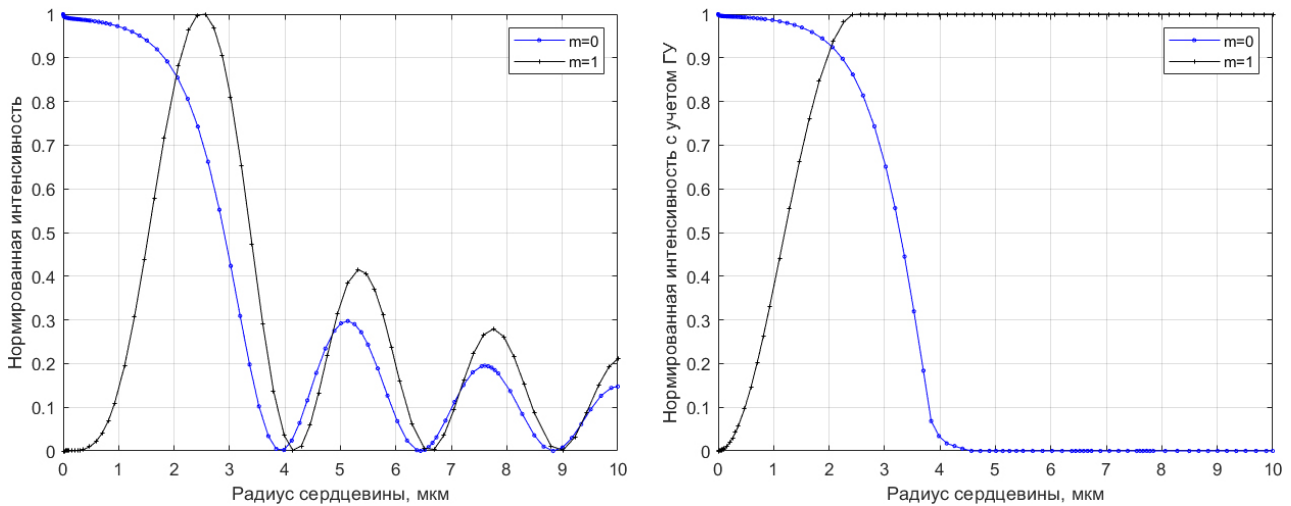


Рис. 1. Распределение радиального поля  $U(r)$  при  $m = 1$  и  $m = 0$ ; (слева) прямое решение, (справа) с граничными условиями

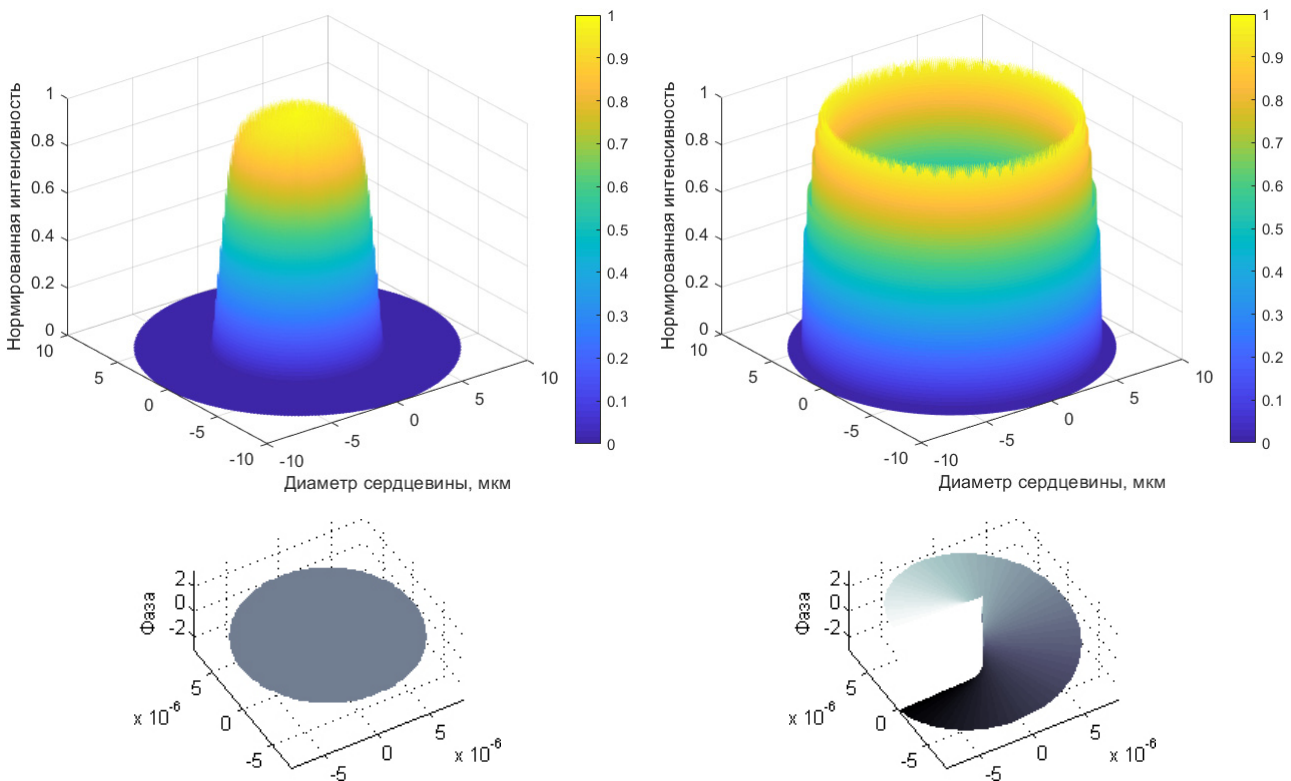


Рис. 2. Распределение интенсивности и фазы солитоноподобных вихрей: (слева) для  $m = 0$ , трехмерная визуализация решения (5); (справа) то же для  $m = 1$

терны интенсивности разнесены пространственно, что обеспечивает их ортогональность.

Для дальнейшего рассмотрения процесса распространения мод необходимо сделать несколько предположений. Во-первых, мы рассматриваем оптические сигналы на длине волны до 1310 нм, где хроматическая дисперсия (ХД) обращается в нуль. Во-вторых, общая протяженность оптической линии связи составляет несколько километров [6], поэтому даже наличие ХД не окажет существенного влияния. В-третьих, предполагается, что солитоноподобные вихри не подвержены

влиянию ХД и дифракционной расходимости, поэтому будем считать, что подобные вихри не искажаются при распространении и распределение их поля остается неизменным.

Как следует из [7], для описания распространения вихревых мод в диспергирующих средах необходимо выполнить простую замену  $\vec{E} \rightarrow \vec{E}_n(\omega)$ ; в этом случае все параметры волн, сохраняющиеся в свободном пространстве, сохраняются и у мод в диспергирующей среде.

Более того, при помощи спинорного анализа распространения волн в нелинейных средах мож-

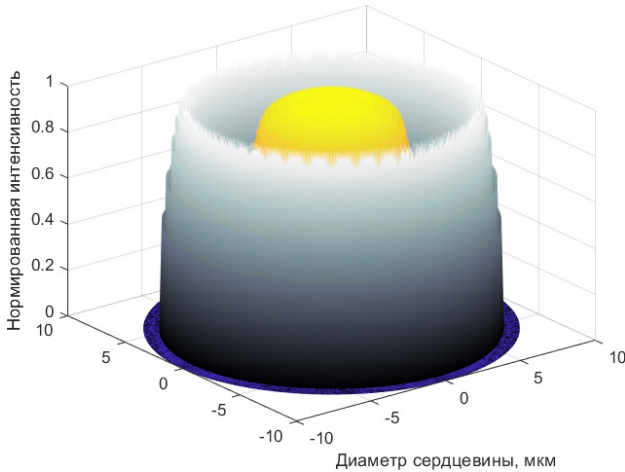


Рис. 3. Суперпозиция мод с  $m=0$  (в центре) и  $m=1$

но показать, что в нелинейной среде полный угловой момент – комбинация поляризации и орбитального момента – сохраняется. Однако введение случайных искажений волокна в виде матрицы распространения, состоящей из случайных комплексных коэффициентов (согласно [8]), приводит к следующим распределениям интенсивности и фазы в начале и на выходе волокна для порядка  $m=1$  и длины волокна 3 км (рис. 4) с использованием численных решений уравнения (5).

Искажения, рассмотренные в матрице [8], учитывают не только дисперсию, но и любые возмущения: изгибы, скручивания, трещины и т. д. Считается, что солитоноподобный вихрь является нечувствительным к дисперсии и дифракции; в общем случае подход к моделированию, описанный в [8], приводит к случайным результатам при использовании различных случайных матриц. Можно показать, что использование подхода, основанного на уравнении Дирака, предложенного в [7], дает решения, нечувствительные к дисперсии (то есть коэффициентами дифференциальной групповой задержки (ДГЗ), входящими в матрицу распространения [8], можно пренебречь), поэтому в случае невозмущенного волокна не будет искажения и смешения мод.

## 2. Синтез фазово-амплитудного фильтра для формирования оптоволоконных мод с заданным спин-орбитальным состоянием

Для генерации вихревого пучка в оптическом волокне как в линейном, так и в нелинейном режимах используются дифракционные элементы free-space оптики, известные как МОДАНЫ [4]. Это широкий класс оптических элементов, вклю-

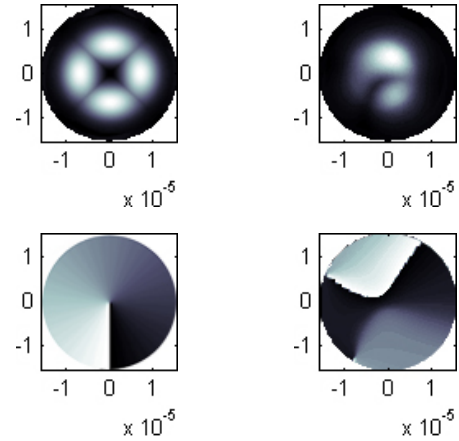


Рис. 4. Искажение солитоноподобного вихревого поля: слева – поле в начале волокна (сверху – паттерн интенсивности, снизу – распределение фазы), справа – искажение интенсивности и фазы на выходе оптоволоконна (сверху и снизу, соответственно)

чающий, например, дифракционные оптические элементы (ДОЭ) и фазово-амплитудный фильтр, описанный в данном разделе. После формирования оптического луча с заданным состоянием ОУМ его вводят в волокно с помощью оптических коллиматоров и линз. В данной работе рассмотрен фильтр, который формирует особый тип вихревого пучка, сохраняющего как поляризацию, так и орбитальный угловой момент.

Конструкция фазово-амплитудного фильтра, формирующего ОУМ-моду с заданным состоянием поляризации, рассчитывается на основе гамильтонова подхода и спинорного представления уравнений Максвелла. Этот подход позволяет учитывать внешние факторы и находить сохраняющиеся значения для эффектов, связанных с поляризацией и орбитальным угловым моментом.

По аналогии с [9] используем формализованное квантово-механическое представление электромагнитной волны в виде биспинора:

$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix} E_z \\ E_x + iE_y \\ iH_z \\ -H_y + iH_x \end{pmatrix},$$

где  $E$  и  $H$  – векторы электрического и магнитного полей соответственно. Такое описание в квантовой электродинамике справедливо для фермионных частиц с нулевой массой покоя (например, нейтрино).

Уравнение распространения может быть определено в виде:

$$i \frac{\partial |\psi\rangle}{\partial z} = \hat{H} |\psi\rangle \quad (6)$$

где гамильтониан записывается как:

$$\hat{\mathbf{H}} = (\vec{\sigma}' \times \nabla)_z + \omega \alpha_z, \quad (7)$$

где  $\alpha_z$  – матрица Дирака [9];  $\nabla$  – оператор Гамильтона (набла), а матрица Паули  $\vec{\sigma}'$ .  $2 \times 2$  определяется следующим образом:

$$\vec{\sigma}' = \begin{pmatrix} \vec{\sigma} & 0 \\ 0 & \vec{\sigma} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

Матрицы Паули определяют спиновое состояние волны со спиральным фазовым фронтом:

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Полный ортогональный набор векторов состояний, включая волны с постоянными распространения  $\beta > 0$  и  $\beta < 0$ , и состояния с проекцией спина на направление распространения  $S_z > 0$ , и  $S_z < 0$ , может быть представлен четырьмя векторами:

$$\begin{aligned} |\psi_1\rangle &= \begin{pmatrix} \varphi_{m-1}^+ \\ 0 \\ \frac{\beta}{\omega} \varphi_{m-1}^+ \\ \frac{j\chi}{\omega} \varphi_m^+ \end{pmatrix}; & |\psi_2\rangle &= \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi_{m-1}^- \\ \frac{j\chi}{\omega} \varphi_m^- \\ \frac{\beta}{\omega} \varphi_{m-1}^- \end{pmatrix}; \\ |\psi_3\rangle &= \begin{pmatrix} -\frac{\beta}{\omega} \varphi_{m-1}^+ \\ \frac{j\chi}{\omega} \varphi_m^+ \\ \varphi_{m-1}^+ \\ 0 \end{pmatrix}; & |\psi_4\rangle &= \begin{pmatrix} \frac{j\chi}{\omega} \varphi_m^- \\ \frac{\beta}{\omega} \varphi_{m-1}^- \\ 0 \\ \varphi_{m-1}^- \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\chi$  – радиальное волновое число [9].

Введем набор радиально-угловых функций с зависимостью от азимутального индекса  $m$ :

$$\varphi_m^+ = J_m(\chi\rho) \exp(jm\varphi),$$

$$\varphi_m^- = J_m(\chi\rho) \exp(-jm\varphi),$$

$$\varphi_{m-1}^+ = J_{m-1}(\chi\rho) \exp(j(m-1)\varphi),$$

$$\varphi_{m-1}^- = J_{m-1}(\chi\rho) \exp(-j(m-1)\varphi).$$

Используя полный набор векторов ортогональных состояний, можно найти матрицу унитарного преобразования  $\mathbf{U}$ , которая приводит гамильтониан  $\hat{\mathbf{H}}$  в уравнении распространения (6) к диагональной форме таким образом, что преобразованный гамильтониан  $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{U}\mathbf{H}\mathbf{U}^+$  можно записать в виде:

$$\tilde{\mathbf{H}} = \beta(\omega) \sigma'_z \gamma_0, \quad (10)$$

где диагональная матрица  $\gamma_0$  равна матрице Дирака [10].

Матрица унитарных преобразований определяется как:

$$\mathbf{U} = \frac{1}{\sqrt{T}} \begin{pmatrix} \varphi_{m-1}^+ & 0 & -\frac{\beta}{\omega} \varphi_{m-1}^+ & \frac{j\chi}{\omega} \varphi_m^- \\ 0 & \varphi_{m-1}^- & \frac{j\chi}{\omega} \varphi_m^+ & -\frac{\beta}{\omega} \varphi_{m-1}^- \\ \frac{\beta}{\omega} \varphi_{m-1}^+ & \frac{j\chi}{\omega} \varphi_m^- & \varphi_{m-1}^+ & 0 \\ \frac{j\chi}{\omega} \varphi_m^+ & \frac{\beta}{\omega} \varphi_m^- & 0 & \varphi_{m-1}^- \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где нормирующая функция  $T$  определяется выражением:

$$T = J_{m-1}^2(\chi\rho) + J_m^2(\chi\rho) + \frac{\beta^2}{\omega^2} (J_{m-1}^2(\chi\rho) - J_m^2(\chi\rho)).$$

Можно проверить, что матрица (11) удовлетворяет соотношению унитарности:  $\mathbf{U}\mathbf{U}^+ = 1$ , а система векторов состояний (9) превращается в систему единичных векторов:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}^+ |\varphi_1\rangle &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = |\tilde{\varphi}_1\rangle, & \mathbf{U}^+ |\varphi_2\rangle &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |\tilde{\varphi}_2\rangle, \\ \mathbf{U}^+ |\varphi_3\rangle &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = |\tilde{\varphi}_3\rangle, & \mathbf{U}^+ |\varphi_4\rangle &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |\tilde{\varphi}_4\rangle. \end{aligned} \quad (12)$$

Векторы состояния  $|\varphi_1\rangle$  и  $|\varphi_4\rangle$  соответствуют случаю  $\beta > 0$ , т. е. волны, распространяющиеся в положительном направлении вдоль оси  $z$ , могут быть заданы в качестве мод, сохраняющих как поляризацию, так и проекцию ОУМ на ось  $z$  во время распространения. Преобразованный гамильтониан коммутирует как с оператором проекции спина на ось  $z$ , так и с оператором проекции углового момента на ось  $z$ :

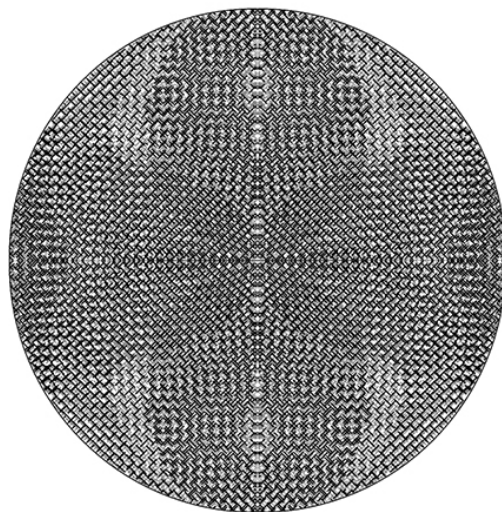
$$[\hat{\mathbf{H}}, \sigma'_z] = 0, \quad [\mathbf{U}, M_z] = 0. \quad (13)$$

Известно, что любая унитарная матрица  $M$ , в частности  $\mathbf{U}$  (11), может быть представлена в символической форме:  $M = \exp\{jA\}$ , где  $A$  – некоторая эрмитова матрица ( $A^+ = A$ ). Если  $|\Phi_n\rangle$  является собственным вектором матрицы  $A$  с собственным значением  $\Lambda_n$ , то имеет место следующее соотношение:

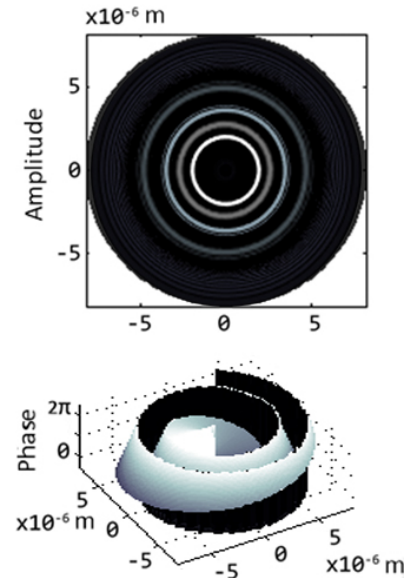
$$A|\Phi_n\rangle = \Lambda_n |\Phi_n\rangle \quad \text{или} \quad M|\Phi_n\rangle = \exp(j\Lambda_n) |\Phi_n\rangle. \quad (14)$$

Значения функциональной матрицы будут равны  $\langle \Phi_n | M | \Phi_n \rangle = \exp(j\Lambda_n)$ , что в технической интерпретации является функцией фазы, которая является скалярной. Данная функция может быть





а)



б)

**Рис. 5.** Фазовое распределение ( $0^\circ$  – черный тон и  $180^\circ$  – белый тон) фазового фильтра (а), который обеспечивает однородное состояние поляризации для вихря первого порядка (б)

дискретизирована для использования при разработке ДОЭ.

Вышеупомянутый подход раскрывает принципиальную техническую возможность расчета и создания фазово-амплитудного или фазового фильтра, формирующего композицию вихревых мод с однородным состоянием поляризации. По аналогии с [11] с использованием (11)–(14) для предложенного фильтра было рассчитано распределение фаз (рис. 5, а) для 1310 нм. Рассчитанные амплитудные и фазовые параметры сигнала со спиральным фазовым фронтом на выходе проектируемого фильтра представлены на рис. 5, б.

Разработанный фазовый фильтр формирует две вихревые моды с топологическим порядком  $\ell = 1$  (вращение по часовой стрелке) и  $\ell = 2$  (вращение против часовой стрелки). Предложенный фильтр может применяться в системах RoF  $W$ -диапазона для дополнительного мультиплексирования каналов данных, настройки каналов обслуживания и т. д. Однако для таких случаев алгоритм разработки фильтра должен быть усовершенствован с учетом рабочей частоты и ширины полосы системы. Чисто с математической точки зрения угловая частота  $\omega$  включена в матрицу (6); кроме того, она используется в расчете функции  $T$ . Это означает, что этот подход можно использовать для расчета функции передачи для разных длин волн: от 850 нм до 1310 нм, как упоминалось в предыдущей главе, поэтому фильтр должен быть широкополосным. Широкополосность может быть реализована с помощью метода, представленного в [12], или технологии изменения показателя преломления

материала [13]. Дифракционная эффективность (ДЭ) в нашем случае оценивалась путем численного расчета скалярного произведения эталонного вихревого пучка (определенного в [4]) и пучка, сгенерированного фильтром. Это значение находится в пределах 80–90 %, что означает высокую модовую чистоту сгенерированного пучка. Параметры реального ДОЭ могут варьироваться в зависимости от материалов и технологии производства.

Дальнейшие исследования предлагаемого сегмента RoF в  $W$ -диапазоне заключаются в разработке метода бесперебойной передачи сигнала от оптической части к радио- и наоборот. В нашем случае, чтобы обеспечить правильную работу метода формирования луча, необходимо разработать экспериментальный прототип для радиооптического преобразователя, который преобразует вихревые моды в оптическом волокне в электрические сигналы для управления излучением антенны. Идея состоит в том, чтобы использовать систему пространственных фильтров, связанных с вихревыми модами. Электрические сигналы для формирования луча могут быть сформированы на основе оптических линий задержки. Параметры оптических линий задержки соответствуют требуемой форме и углу наклона луча на выходе фильтра.

## Заключение

В данной статье рассматривается распространение солитоноподобных вихрей в оптическом волокне. Показано, что из-за относительно малой длины сегментов волокна (до нескольких киломе-

тров) такими искажениями сигнала, как дисперсия, можно пренебречь. Кроме того, построение модовых композиций с помощью спинорного подхода обеспечивает нечувствительные к дисперсии оптические вихри, которые могут быть использованы в дальнейших разработках систем RoF. Предложенный фазово-амплитудный фильтр может быть использован для генерации вихревых пучков, сохраняющих как поляризацию, так и угловой мо-

мент при распространении в оптическом волокне, обеспечивая высокую модовую чистоту. Эти фильтры должны применяться в будущих системах RoF для эффективного разделения вихревых сигналов на удаленных участках, а также для управления диаграммой направленности антенн.

Работа осуществлена при поддержке Российского научного фонда (РНФ) (проект № 18-19-00123).

### Список литературы

1. The propagation model of modulated subterahertz signals in the RoF communication systems / I.L. Vinogradova [et al.] // *Proc. SPIE*. 2018. Vol. 11146. P. 1114607. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2526789>.
2. Ultra-wideband vortex antenna array design for high capacity radio links / G.I. Abdrakhmanova [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1096. № 1. P. 012164. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012164>.
3. Kivshar Y.S., Agrawal G.P. *Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals*. Cambridge: Academic Press, 2003. 647 p.
4. *Computer Design of Diffractive Optics* / ed. by V.A. Soifer. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. 896 p.
5. Few-mode Optical Fiber Series. URL: <https://fiber-optic-catalog.oftoptics.com/item/few-mode-optical-fiber-series/few-mode-optical-fiber-series1/80731> (дата обращения: 11.11.2019).
6. Защищенный сегмент RoF субтерагерцового диапазона с независимой оптической модуляцией частотных свойств радиоканала и параметра управления фазированной антенной решеткой / И.Л. Виноградова [и др.] // *Компьютерная оптика*. 2018. Т. 42. № 5. С. 786–799. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-5-786-799>.
7. Bagmanov V.K., Sultanov A.K. Justification and analysis of OAM-carrying electromagnetic fields spinor propagation equation for dispersive media // *Proc. SPIE*. 2018. Vol. 10774. P. 107741T. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2318854>.
8. Ho K.-P., Kahn J.M. Linear propagation effects in mode-division multiplexing systems // *Journal of Lightwave Technology*. 2014. Vol. 32. № 4. P. 614–628.
9. Derickson D. *Fiber Optic Test and Measurement*. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 672 p.
10. Ерохин Г.А., Чернышев О.В., Козырев Н.Д. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 2009. 540 с.
11. Математическая модель полностью оптической системы детектирования параметров распространения мод в оптическом волокне при маломодовом режиме для адаптивной компенсации смещения мод / В.С. Любопытов [и др.] // *Компьютерная оптика*. 2013. Т. 37. № 3. С. 352–359.
12. Волоконные решетки показателя преломления и их применения / С.А. Васильев [и др.] // *Квантовая электроника*. 2005. Т. 35. № 12. С. 1085–1103.
13. Khonina S.N., Volotovskiy S.G. Self-reproduction of multimode laser fields in weakly guiding stepped-index fibers // *Optical Memory and Neural Networks*. 2007. Vol. 16. № 3. P. 167–177. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1060992X07030071>.

### References

1. Vinogradova I.L. et al. The propagation model of modulated subterahertz signals in the RoF communication systems. *Proc. SPIE*, 2018, vol. 11146, p. 1114607. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2526789>.
2. Abdrakhmanova G.I. et al. Ultra-wideband vortex antenna array design for high capacity radio links. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1096, no. 1, p. 012164. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012164>.
3. Kivshar Y.S., Agrawal G.P. *Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals*. Cambridge: Academic Press, 2003, 647 p.
4. *Computer Design of Diffractive Optics*. Ed. by V.A. Soifer. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012, 896 p.
5. *Few-mode Optical Fiber Series*. URL: <https://fiber-optic-catalog.oftoptics.com/item/few-mode-optical-fiber-series/few-mode-optical-fiber-series1/80731> (accessed: 11.11.2019).
6. Vinogradova I.L. et al. Protected segment RoF subterahertz range with an independent optical modulation radio frequency characteristics and a control parameter phased array antenna. *Komp'yuternaya optika*, 2018, vol. 42, no. 5, pp. 786–799. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-5-786-799>. [In Russian].
7. Bagmanov V.K., Sultanov A.K. Justification and analysis of OAM-carrying electromagnetic fields spinor propagation equation for dispersive media. *Proc. SPIE*, 2018, vol. 10774, p. 107741T. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2318854>.
8. Ho K.-P., Kahn J.M. Linear propagation effects in mode-division multiplexing systems. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, vol. 32, no. 4, pp. 614–628.
9. Derickson D. *Fiber Optic Test and Measurement*. New Jersey: Prentice Hall, 1998, 672 p.
10. Erohin G.A., Chernyshev O.V., Kozыrev N.D. *The Antenna-Feeder Device and Propagation*. Moscow: Radio i svyaz', 2009, 540 p. [In Russian].
11. Ljubopytov V.S. et al. A mathematical model of the system is completely optical detection mode propagation in the optical parameters of the fiber at low-mode mode for the adaptive compensation modes mixing. *Komp'yuternaya optika*, 2013, vol. 37, no. 3, pp. 352–359. [In Russian].

12. Vasil'ev S.A. et al. The fiber grating of the refractive index and their use. *Kvantovaya elektronika*, 2005, vol. 35, no. 12, pp. 1085–1103. [In Russian].
13. Khonina S.N., Volotovskiy S.G. Self-reproduction of multimode laser fields in weakly guiding stepped-index fibers. *Optical Memory and Neural Networks*, 2007, vol. 16, no. 3, pp. 167–177. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1060992X07030071>.

UDC 654.09

DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.121-128

Received: 03.09.2019

Accepted: 02.10.2019

## The use of non-dispersive soliton-like fiber optic vortices to increase the efficiency of RoF systems

*I.L. Vinogradova, A.R. Gizatulin, I.K. Meshkov,  
E.P. Grakhova, V.Kh. Bagmanov, A.Kh. Sultanov*

Ufa State Aviation Technical University  
12, K. Marx Street  
Ufa, 450008, Russian Federation

In this article, the propagation of soliton-like vortex beams in the optical segment of a Radio-over-Fiber system is discussed. The approach is based on the solution of the nonlinear Schrödinger equation for the Kerr nonlinear medium like optical fiber. A numerical solution of the nonlinear Schrödinger equation for vortex solitons was obtained; the propagation of soliton-like vortices along an optical fiber is simulated. Besides, a phase-amplitude filter that generates optical signals with a given state of the orbital angular momentum and conservation of polarization during propagation through the optical fiber was modeled. The amplitude-phase filter was designated based on the spinor representation of Maxwell's equations.

*Keywords:* RoF systems, W-band, vortex modes, soliton-like modes, amplitude phase filter, non-dispersive propagation.

**Виноградова Ирина Леонидовна**, 1970 г. р., доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ). В 1992 г. окончила Уфимский авиационный институт (ныне УГАТУ) по специальности «Информационно-измерительная техника».

*Область научных интересов:* волоконная оптика, телекоммуникационные системы, математическая обработка сигналов, широкополосные системы передачи, антенная техника.

*E-mail:* vil-4@mail.ru

**Гизатулин Азат Ринатович**, 1992 г. р., ассистент кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ). В 2016 г. окончил УГАТУ по направлению подготовки магистров «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

*Область научных интересов:* волоконная оптика, телекоммуникационные системы.

*E-mail:* azat\_poincare@mail.ru

**Мешков Иван Константинович**, 1985 г. р., кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ). В 2007 г. окончил УГАТУ по специальности «Радиосвязь, радиовещание и телевидение».

*Область научных интересов:* обработка сигналов, спутниковые данные, обработка цифровых сигналов.

*E-mail:* mik.ivan@bk.ru

**Грахова Елизавета Павловна**, 1990 г. р., кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ). В 2012 г. окончила УГАТУ по специальности «Радиосвязь, радиовещание и телевидение».

*Область научных интересов:* обработка сигналов, сверхширокополосные системы передачи, антенная техника.

*E-mail:* eorlingsbest@mail.ru

**Багманов Валерий Хусаинович**, 1951 г. р., доктор технических наук, профессор кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета. Окончил физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Является членом международного научного общества SPIE.

*Область научных интересов:* моделирование и обработка сложных сигналов в телекоммуникационных системах.

*E-mail:* tks@ugatu.ac.ru

**Султанов Альберт Ханович**, 1950 г. р., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета. В 1973 г. окончил Новосибирский электротехнический институт связи (ныне Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики) по специальности «Многоканальная электросвязь».

*Область научных интересов:* полупроводниковая и антенная техника, оптика, связь, обработка изображений.

*E-mail:* tks@ugatu.ac.ru