

ФОТОНИКА

УДК 654.09

05.11.07

ФОРМИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СИГНАЛОВ В РАДИООПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

А.Р. Гизатулин, И.К. Мешков, В.Х. Багманов, И.Л. Виноградова

Уфимский государственный авиационный технический университет,
Республика Башкортостан, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12

Аннотация. Рассматривается процесс формирования вихревых волоконных мод (т.е. переносящих орбитальный угловой момент) с помощью вихревых волоконных брэгговских решеток (ВВБР). В рамках работы приведена обобщенная математическая модель ВВБР, включающая в себя произвольную функцию аподизации и чирпирования, что позволяет рассчитывать решетки, формирующие вортексные моды заданного порядка для требуемого частотного диапазона с требуемым коэффициентом отражения. Предложен матричный способ описания ВВБР, основанный на математическом аппарате теории смешанных мод и матриц рассеяния. Проведено имитационное моделирование рассматриваемых волоконных структур, рассмотрен процесс конвертирования вихревого оптического излучения в радиодиапазон.

Ключевые слова: вихревые сигналы, волоконные брэгговские решетки.

Введение

На сегодняшний день спрос на широкополосные мультимедийные услуги стремительно растет. Это связано с возрастающим объемом передаваемых данных в рамках развития цифровой экономики и расширения спектра услуг (видеоконференцсвязь, телемедицина, онлайн-трансляции и т.д.). В общемировой практике построения магистральных линий связи широкое распространение получили системы связи с одновременным мультиплексированием по времени и длине волны. Как показывают последние исследования и прогнозы, текущий технологический уровень волоконно-оптических систем передачи уже практически полностью исчерпал ресурсы временной и частотной областей и дальнейшее повышение скорости передачи в волокне ограничено нелинейностью керровского типа (так называемый предел Шеннона). Данное обстоятельство заставляет исследователей искать альтернативные физические параметры электромагнитных (ЭМ) волн, которые могут быть использованы для передачи информации.

В последние десятилетия (особенно с начала 2010-х годов) в технологически развитых странах (США, Великобритания, Израиль, Япония, Китай, Австралия) наблюдается чрезвычайный рост количества научно-исследовательских тематик и объемов проводимых НИР в области оптических систем связи на основе мультиплексирования с пространственным разделением каналов или модовым мультиплексированием (MDM, от англ. mode domain multiplexing). Применение мультиплексирования с пространственным разделением в волоконно-оптических телекоммуникационных системах потенциально способно обеспечить многократное повышение скорости передачи по одному оптическому волокну (ОВ).

В частности, высокий интерес исследователей вызывает орбитальный угловой момент (ОУМ) ЭМ-колебаний, проявляющийся в вихревой дислокации волнового фронта. Одна из актуальных задач в этой области – генерация ОУМ-колебаний. Существует ряд предложенных концепций, до сих пор не нашедших коммерческого воплощения в силу дороговизны и/

или сложности практической реализации, а проблема преобразования ОУМ-излучения из оптического в радиодиапазон является малоизученной. Кроме того, большинство методов формирования оптического ОУМ-излучения основано на использовании компонентов free-space оптики (оптики в свободном пространстве), которые не могут быть интегрированы в существующие системы связи.

В связи с этим в рамках данной работы предлагаются способы формирования ЭМ-колебаний, переносящих ОУМ как в радио-, так и в оптическом диапазонах, отличающиеся потенциальной возможностью интеграции в уже развернутые системы связи. В радиодиапазоне ведутся активные исследовательские работы по использованию субмиллиметрового диапазона как наименее загруженного и перспективного с точки зрения пропускной способности.

Известно, что современные сети беспроводной связи используют волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) в качестве базовых сетей (backbone network), поэтому принципы генерации ОУМ-сигналов (вихревых сигналов), предложенные в рамках данной работы, могут быть использованы при построении волоконно-оптических систем связи будущих поколений: так, ВОЛС будут лежать в основе сетей 6G (например, активно будут использоваться технологии PON). Исследования межуниверситетского проекта ComSenTer сосредоточены на использовании чрезвычайно высоких частот в диапазоне от 100 ГГц до 1 ТГц. По мнению исследователей, это позволит максимально упростить коммуникационные системы, обеспечивая возможность одновременного использования сотен и даже тысяч беспроводных подключений с пропускной способностью в 10-1000 раз большей по сравнению с ближайшими системами и сетями 5G.

Как известно, электромагнитные волны переносят как энергию, так и импульс, причем импульс включает в себя линейный импульс P и угловой момент L . В частности, угловой момент имеет составляющую, связанную с поляризацией, спиновым угловым моментом, и другую составляющую, связанную с пространственным распределением поля, которая называется орбитальный угловой момент. В оптическом вихревом излучении плоскости постоянной фазы электрического и магнитного полей образуют вихревую структуру, движущуюся в направлении распространения сигнала. ОУМ характеризуется числом – топологическим зарядом, указывающим количество поворотов, которые поле совершают на одной длине волны. Потенциал применения ОУМ в области коммуникаций огромен даже несмотря на то, что до полного развертывания ОУМ-сетей еще предстоит решить ряд задач.

Одной из основных проблем при разработке систем связи на основе ОУМ-сигналов является генерация волн со спиральным волновым фронтом. Существует два основных подхода: на основе оптики в свободном пространстве и методы волоконной оптики. В рамках первой группы можно выделить следующие решения: цилиндрические линзы, спирально-фазовые пластины, голограммические решетки, SLM, метаматериалы, жидкокристаллические q-пластины и т.д. Для генерации ОУМ с применением этих методов необходимо использовать инструменты, основанные на пространственном преобразовании света и вводе оптического луча из свободного пространства в оптическое волокно, что, в свою очередь, приводит к проблемам, связанным со сложностью стабилизации и юстировки оптомеханических инструментов, чувствительности к вибрации, высокой стоимости, сложности установки и т.д. Такие инструменты можно использовать только при лабораторных исследованиях и экспериментах.

Предлагаемый метод формирования вихревого оптического излучения позволит создать пассивные оптоволоконные устройства для телекоммуникационных систем в качестве гене-

раторов вихревых мод. Кроме того, рассмотрено влияние эксплуатационных факторов на структуру ОУМ-сигналов, передаваемых по оптическому волокну, например, микроизгибов оптоволокна. В радиодиапазоне ведутся активные исследовательские работы по использованию субмиллиметрового диапазона как наименее загруженного и перспективного с точки зрения пропускной способности, для чего в данной работе предлагается использовать нелинейную среду при преобразовании вихревого оптического излучения в радиодиапазон.

Формирование ОУМ-сигналов

Классические волоконные брэгговские решетки, представляющие собой дискретный набор штрихов [1], могут быть описаны с помощью теории смешанных мод. Генерация ОУМ моды в данном контексте фактически означает конвертирование фундаментальной моды в моду высшего порядка: необходимо добиться преобразования моды ОУМ0 в ОУМ1. Известно, что для существования вихревого излучения необходим маломодовый режим, так как любая ОУМ-мода ненулевого порядка представляет собой суперпозицию TE и TM мод [2].

Таким образом, для работы в оптическом С-диапазоне (1530-1565 нм) нужно использовать специальные волокна, являющиеся маломодовыми в данном участке спектра, например ступенчатые компании OFS. Для данного волокна применимо приближение слабонаправляющего волокна, т.е. волокна, у которого разность показателей преломления сердцевины и оболочки меньше 1 %. В таком случае для описания модового состава (в том числе и ОУМ-мод) можно использовать аппарат бесселевых функций и линейно-поляризованных (LP) мод [2].

Итак, постановку задачи можно сформулировать следующим образом: необходимо разработать решетку, преобразующую ОУМ-моду нулевого порядка (LP_{01}) в ОУМ-моду первого порядка (суперпозицию $LP_{11}^e + iLP_{11}^o$). Общий вид ВВБР показан на рис. 1.

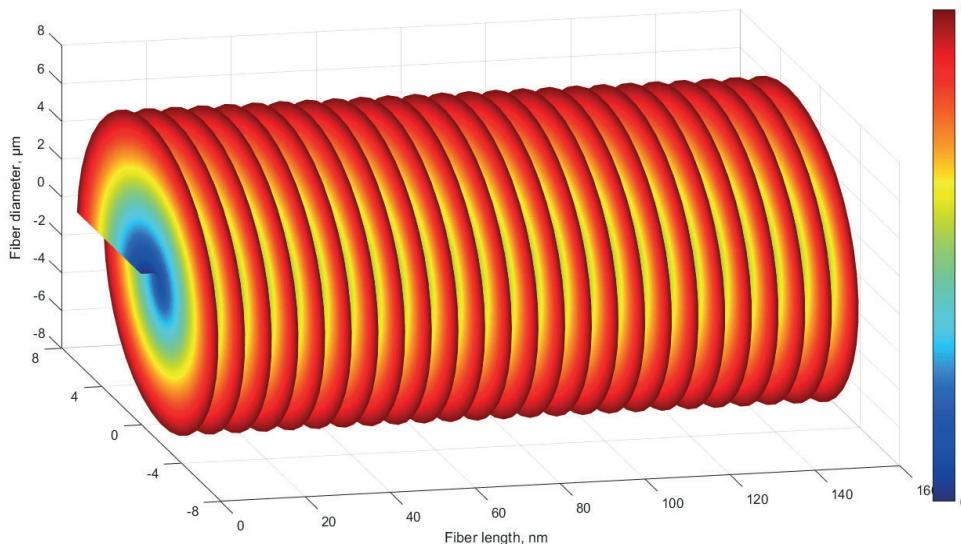


Рис. 1. Общий вид вихревой ВБР

Математически ВВБР может быть описана следующим образом:

$$n(r, \varphi, z) = n_0 + \Delta n \left[e^{-i\beta_0 z} \cdot g(z) \cdot f(r) \cdot e^{im\varphi} + \text{к.с.} \right], \quad (1)$$

где Δn – амплитуда модуляции показателя преломления для обоснованности использования приближения слабонаправляющего волокна должна быть меньше, чем в обычной ВБР; m – порядок ОУМ; $\beta_0 = 2\pi/\gamma(z)$, $\gamma(z)$ – функция чирпирования, которая используется для создания широкополосной ВВБР и в общем случае имеет произвольную форму; $g(z)$ – функция аподизации решетки; $f(r)$ – радиальная функция, описывающая профиль показателя преломления решетки (рис. 2); Λ – период решетки: $\Lambda = \lambda_B / (n_{0l} + n_{1l})$; n_{0l} и n_{1l} – эффективные показатели преломления падающей (ОУМ = 0) и отраженной мод (ОУМ = 1), соответственно – данное соотношение найдено исходя из методики, приведенной в работах [3, 4]; λ_B – брэгговская длина волны.

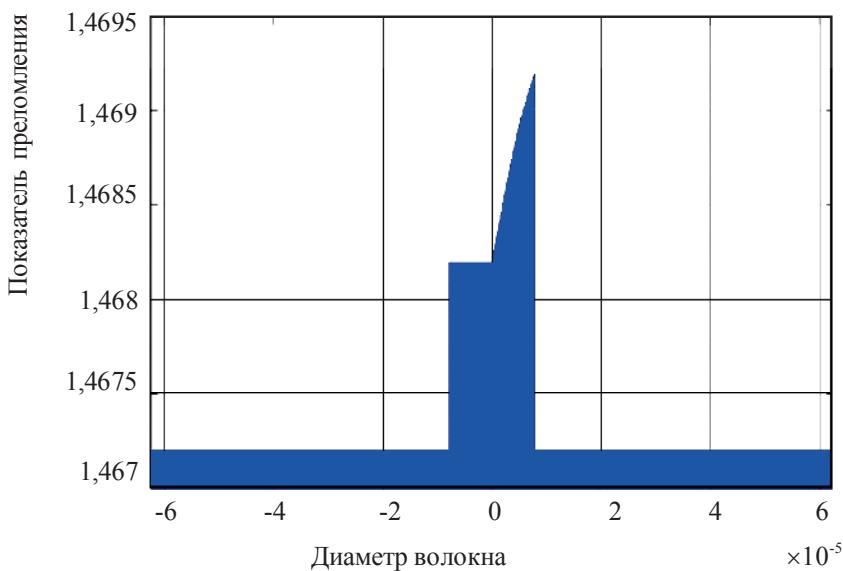


Рис. 2. Профиль показателя преломления штриха вихревой ВБР

Стоит отметить, что угловая позиция $\Delta\varphi$ штриха решетки может быть найдена как $\Delta\varphi = (2\pi / \Lambda) \cdot \Delta z$, где Δz – приращение по длине решетки. В общем случае данная зависимость выглядит как $\Delta\varphi = (m2\pi / \Lambda) \cdot \Delta z$, где m – порядок ОУМ. С помощью интегралов наложения легко доказать, что предлагаемая функция $f(r)$, описываемая функциями Бесселя, обеспечивает потенциальную эффективность конвертирования мод в 100 %. Как известно, интеграл наложения k_{ab} можно представить в следующем виде [5]:

$$k_{ab}(z) \propto \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta n^2(x, y) \vec{E}_{\mu}^*(x, y) \cdot \vec{E}_{\nu}(x, y) dx dy \cdot f(z), \quad (2)$$

где $\delta n^2(x, y)$ – поперечное возмущение показателя преломления; $\vec{E}_{\mu}^*(x, y)$ и $\vec{E}_{\nu}(x, y)$ – распределения полей мод; $f(z)$ – некоторая функция от z , описывающая продольное изменение показателя преломления.

Учитывая, что величина Δn должна быть порядка 10^{-3} (что будет пояснено), можно пре-небречь слагаемым, содержащим Δn^2 , и записать:

$$n^2(r, \varphi) \approx n_0^2 + 2n_0 \Delta n \cdot e^{-i\beta_0 z} \cdot f(r) \cdot e^{im\varphi}. \quad (3)$$

Здесь $\delta n^2(r, \varphi) = 2n_0 \Delta n \cdot f(r) \cdot e^{im\varphi}$. Тогда выражение (2) можно переписать как

$$k_{ab} = \omega \varepsilon_0 n_0^2 \Delta n \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{co}} r \cdot e^{im\varphi} f(r) \cdot \overrightarrow{E}_{11}^*(r, \varphi) \cdot \overrightarrow{E}_{01}(r, \varphi) dr d\varphi. \quad (4)$$

Выражение (4) должно обеспечивать максимально возможную вероятность преобразования моды ОУМ₀ в ОУМ₁.

Одним из главных показателей эффективности предлагаемой ВВБР с точки зрения возбуждения необходимой моды $E_{11}(r, \varphi)$ является так называемая модовая чистота. В данном случае это означает, что в модовом составе отраженного излучения необходимо наличие единственной моды – $E_{11}(r, \varphi)$, т.е. моды ОУМ₁. Определить модовую чистоту можно, оценив интегралы наложения (2) фундаментальной моды $E_{01}(r, \varphi)$ со всеми собственными модами, поддерживаемыми оптическим волокном. Запишем этот интеграл для произвольной вихревой моды $E_{pq}(r, \varphi)$, предполагая, что порядок решетки m равен единице ($m = 1$):

$$k_{ab} \propto \int_0^{2\pi} e^{i\varphi} e^{-ip\varphi} d\varphi \int_0^{r_{co}} r f(r) \cdot E_{pq}(r) \cdot E_{01}(r) dr$$

или

$$k_{ab} \propto \int_0^{2\pi} e^{i(1-p)\varphi} d\varphi \int_0^{r_{co}} r f(r) \cdot E_{pq}(r) \cdot E_{01}(r) dr. \quad (5)$$

Очевидно, что в выражении (5) при любых $p \neq 1$ определенный интеграл по φ даст нуль, поскольку $\int_0^{2\pi} e^{i\xi\varphi} d\varphi = 0$ при $\xi \neq 0$. Это означает, что интеграл по φ будет ненулевым только для

моды первого порядка, т.е. для моды $E_{11}(r, \varphi)$. С учетом радиальной функции

$$f(r) = \sigma \frac{J_{11}\left(u_{11} \frac{r}{r_{co}}\right)}{J_{01}\left(u_{01} \frac{r}{r_{co}}\right)},$$

где σ – нормировочный коэффициент, интеграл по r в (5) сводится к квадрату нормы функции $E_{11}(r)$, которая в случае ортонормированных сигналов равна единице:

$$k_{ab} \propto \int_0^{2\pi} e^{i\varphi} e^{-i\varphi} d\varphi \int_0^{r_{co}} r f(r) E_{11}(r) E_{01}(r) dr = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{r_{co}} r E_{11}^2(r) dr \propto \|E_{11}(r, \varphi)\|^2.$$

Таким образом, интеграл (5) является ненулевым только для моды ОУМ₁.

Кроме того, можно показать, что изгиб волокна действует как своеобразный «резонатор» смешения мод [6]. «Резонансные» радиусы изгиба определяются длиной волны (так как коэффициенты фазы зависят от длины волны). Данное явление является полезным с практической точки зрения: подбирая периодическое возмущение в соответствии с резонансными радиусами, можно добиться управления перераспределением энергии между модами,

т.е. либо усиливать (за счет ослабления фундаментальной моды), либо ослаблять моды высших порядков. Конкретные радиусы изгиба должны подбираться с учетом параметров волокна и используемой длины волны передачи сигнала. С помощью аппарата теории связанных мод можно сделать ряд выводов.

1. С точки зрения влияния изгибов на потери энергии предпочтительно использование коротких длин волн (в частности, 850 нм), поскольку с ростом длины волны вносимое изгибами затухание возрастает из-за увеличения диаметра поля моды (MFD, от англ. mode field diameter). Даже с учетом высокого собственного затухания в первом окне прозрачности, потери энергии мод на этой длине волны будут ниже, чем на других длинах волн. Данный вывод позволяет подобрать оптимальную длину волны в случаях, когда нужно передавать большие объемы информации на сравнительно небольшие расстояния с использованием MDM.

2. Как показывают расчеты, наиболее сильное смешение происходит между модами смежных порядков, причем чем ниже порядки смежных мод, тем больше по модулю значения их интегралов наложения. Кроме того, модуль интеграла наложения убывает по экспоненциальному закону с ростом радиуса изгиба.

3. Комплексный коэффициент смешения $h_{\mu\nu}$, как показывает формула $h_{\mu\nu} = C_{\mu\nu} e^{i\Delta\beta\Delta z}$, остается неизменным по модулю в зависимости от протяженности изогнутого участка, а меняется только по фазе.

4. Известно, чем больше радиус сердцевины волокна, тем больше по модулю значения интеграла наложения (что можно показать для волокон многомодовых и одномодовых, где радиус сердцевины первого волокна примерно вдвое больше второго). Это также связано с ростом MFD при увеличении радиуса сердцевины волокна. Полученные значения интеграла наложения позволяют оценивать порядок коэффициентов смешения, вносимых изгибами, при дальнейшем моделировании линий с MDM.

5. Комплексная амплитуда паразитных мод осциллирует с частотой, определяемой разностью коэффициентов распространения $\Delta\beta$ в зависимости от радиуса изгиба; эти осцилляции происходят не только по фазе, но и по абсолютному значению: очевидно, что чем больше значения $\Delta\beta$, тем больше частота осцилляции. Осцилирующий характер амплитуды обусловлен тем, что при определенных радиусах изгиба происходят пространственные биения перекачки энергии из одной моды в другую, что повторяется периодически при изменении радиуса изгиба. Отсюда следует важный вывод – изгиб волокна действует как своеобразный «резонатор» смешения мод. «Резонансные» радиусы изгиба определяются длиной волны (поскольку коэффициенты β зависят от длины волны). Данное явление полезно с практической точки зрения: подбирая периодическое возмущение в соответствии с резонансными радиусами, можно добиться управления перераспределением энергии между модами, т.е. либо усиливать (за счет ослабления фундаментальной моды), либо ослаблять моды высших порядков. Конкретные радиусы изгиба должны подбираться исходя из параметров волокна и используемой длины волны передачи сигнала.

6. С ростом длины волны излучения уменьшаются значения интеграла наложения. Это обусловлено тем, что с ростом длины волны увеличиваются значения $\Delta\beta$ разных мод (что означает их меньшую вырожденность), а также увеличивается MFD – моды при больших λ меньше сосредоточены в сердцевине, поэтому меньше смешиваются. Иными словами, при коротких длинах волн моды больше вырождены и смешиваются сильнее, чем при больших длинах волн. Необходимо определять оптимальную длину волны передачи сигнала: либо уменьшать потери на изгибах, либо минимизировать смешение мод.

7. Из-за уменьшения $C_{\mu\nu}$ с ростом длины волны уменьшаются и амплитуды паразитных мод $A_{\mu\nu}$, которые, в свою очередь, обратно пропорциональны $\Delta\beta$: чем больше вырождена мода, тем выше амплитуда паразитных мод.

8. Относительная длина изогнутого участка L вносит фазовый набег амплитуды мод, а также меняет ее абсолютное значение, что объясняется наличием длин изогнутых участков, на которых паразитные моды будут усиливаться (или подавляться). Более того, можно показать, что в случае полной вырожденности мод паразитные моды будут приобретать лишь фазовый набег, а модуль амплитуды будет находиться в прямой зависимости от L . Этот результат означает, что в случае вырожденности мод модуль комплексной амплитуды паразитной моды перестает осциллировать и увеличивается линейно с ростом L .

Итак, изгибы волокна приводят, во-первых, к излучению энергии направляемых мод в окружающее пространство, т.е. к дополнительному затуханию, во-вторых, к нарушению ортогональности мод, что означает перераспределение энергии между ними, в-третьих, к возбуждению мод высших порядков при изначально одномодовом составе сигнала. В целях минимизации потерь, вносимых изгибами, следует использовать более короткие длины волн, что позволяет уменьшить смешение мод при изгиба за счет увеличения потерь. Кроме того, было показано, что существуют резонансные радиусы изгибов и длины изогнутых участков (определеные длиной волны излучения), при которых наблюдаются пики (либо минимумы) амплитуд паразитных мод, следовательно, при определенных деформациях волокна можно добиться возбуждения или подавления мод высших порядков. Таким образом, метод подавления или возбуждения мод высших порядков заключается в поиске радиусов и протяженностей изгибов волокна, при которых достигается требуемое распределение мощностей между модами.

В данной работе предлагается также способ конвертирования оптических вихревых мод из оптического диапазона в радиодиапазон с помощью нелинейного кристалла на основе эффекта генерации разностной частоты. Основная идея конвертирования оптического вихревого излучения в радиодиапазон заключается в использовании двух волн оптической накачки, обладающих порядками ОУМ m_1 и m_2 и имеющих частоты, разность которых соответствует частоте генерируемого радиоизлучения. Данные оптические волны падают на поверхность нелинейного кристалла, в котором за счет нелинейного взаимодействия формируется выходное радиоизлучение с порядком ОУМ $m_3 = m_1 - m_2$ и частотой $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$, где ω_3 – радиочастота, а ω_1 и ω_2 – волны оптической накачки [7]. Схематически предлагаемый способ конвертирования показан на рис. 3.

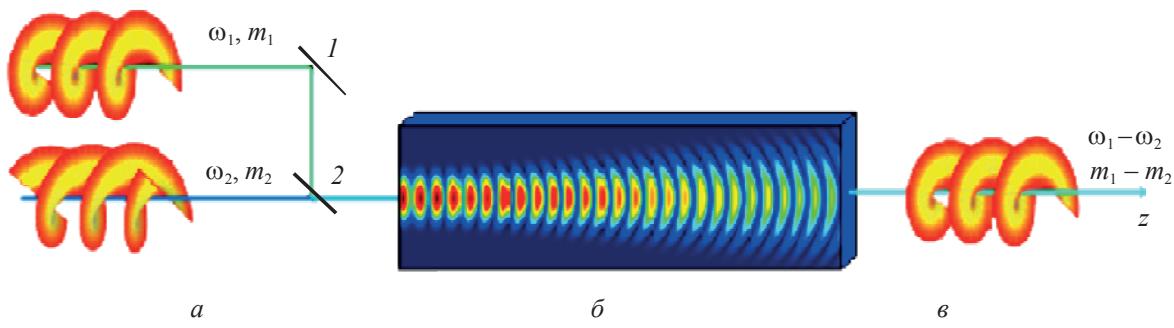


Рис. 3. Моделируемая схема конвертирования вихревых пучков:
 а – оптические вихревые пучки; б – нелинейный кристалл $\chi^{(2)}$; в – вихревой радиопучок
 (1 – непрозрачное зеркало, 2 – полупрозрачное зеркало)

Несмотря на то, что различные процессы трехволнового смешения – формирование второй гармоники, суммарной гармоники и разностной частоты – имеют схожую физическую природу, у каждого процесса свои уникальные особенности, например, генерация разностной частоты в области радиочастот обладает низкой эффективностью по следующим причинам: 1) небольшое значение нелинейной части поляризации по сравнению с линейной частью, что характерно для этих трехволновых процессов, за исключением области очень высоких значений интенсивности первичных гармоник; 2) из-за дипольного механизма излучения волн в кристалле мощность дипольного излучения пропорциональна квадрату частоты, поэтому отношение интенсивностей излучения в радио- и оптическом диапазоне в исследуемой полосе частот мало и пропорционально отношению квадратов соответствующих частот и в контексте данной работы составляет величину порядка $\sim 10^{-5} - 10^{-6}$.

По результатам численного моделирования процесса генерации разностной частоты можно показать: 1) наблюдается асимптотическое поведение показателя эффективности генерации в зависимости от протяженности нелинейной среды; 2) увеличена эффективность генерации при росте разности частот, которая определяет частоту радиовихревого пучка; 3) показано экстремальное поведение показателя эффективности от радиуса перетяжки лазерных пучков накачки.

Заключение

Итак, в рамках данной работы решена задача, имеющая научно-практическое значение: предложены способы формирования ОУМ-излучения в радио- и оптическом диапазонах, обладающего дополнительной степенью свободы, что позволит увеличить пропускную способность радиооптических систем связи. Кроме того, исследовано влияние эксплуатационных факторов (в частности, изгибов оптического волокна) на качество передаваемого оптического сигнала.

Исследование проведено за счет гранта Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФГБОУ ВО УГАТУ # FEUE-2020-0007 по теме «Теоретические основы моделирования и семантического анализа процессов преобразования вихревых электромагнитных полей в инфокоммуникационных системах».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Morozov, O.G., Sakhabutdinov A.J. Addressed fiber Bragg structures in quasidistributed microwave-photonic sensor systems // Computer Optics. 2019. – Vol. 43(4). – Pp. 535-543.
2. Soifer, V.A. et al. Computer design of diffractive opticsifer // Publisher: Woodhead Publishing, Sawston. 2012. – 896 p.
3. Kashyap, R. Fiber Bragg Gratings // London, Academic Press. – 1999. – 478 p.
4. Yamada, M., Sakuda, K. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach // Appl. Optics. – 1987. – Vol. 16. – Pp. 3474-3478.
5. Keang-Po, Ho., Kahn, M. Mode coupling and its impact on spatially multiplexed Systems// Optical Fiber Telecommunications (Sixth Edition) Systems and Networks Optics and Photonics. – 2013. – Pp. 491-568.

6. *Gizatulin, A.R., Sultanov A. Kh.* Vortex modes coupling induced by fiber imperfections and non-regularities // Optical Technologies for Telecommunications: proceedings of SPIE. – 2019. – Vol. 11146. – Pp. 111460Z-1–111460Z-7.

7. *Bagmanov, V.Kh. et al.* The vortex beams conversion from the optical range into the radio domain based on the nonlinear generation of the difference frequency// 27th Telecommunications Forum (TELFOR): conference proceedings – Belgrade, 2019.

FORMATION OF VORTEX SIGNALS IN RADIOPHOTIC COMMUNICATION SYSTEMS

A.R. Gizatulin, I.K. Meshkov, V.Kh. Bagmanov, I.L. Vinogradova

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

Abstract. In this paper, we consider the process of vortex fiber modes formation (i.e., carrying the orbital angular momentum) using vortex fiber Bragg gratings (VFBGs). Within the framework of the article, a generalized mathematical model of VFBG is presented, which includes an arbitrary function of apodization and chirping, which makes it possible to design gratings that form vortex modes of a given order for the required frequency range with the required reflection coefficient. In addition, a matrix method for describing VFBG is proposed, based on the mathematical basis of the coupled modes theory and scattering matrices. Simulation of the considered fiber structures is carried out, the process of converting vortex optical radiation into the radio range is also considered.

Keywords: vortex signals, fiber Bragg gratings.

Статья поступила в редакцию 19.05.2021