

09

Сопоставление методов компенсации поляризационного фединга волоконно-оптических линий передачи аналоговых широкополосных сигналов по вносимым шумам и достижимому динамическому диапазону

© В.В. Лебедев,¹ А.Н. Петров,^{1,2} М.В. Парфенов,^{1,2} Е.Н. Величко,² А.В. Шамрай¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: vladimir_l@mail.ru

Поступило в Редакцию 2 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 1 июня 2021 г.

Принято к публикации 2 июня 2021 г.

Рассмотрены два метода компенсации поляризационного фединга в волоконно-оптических линиях передачи аналоговых сигналов на основе использования ортогональных поляризационных компонентов оптического излучения и с активной подстройкой состояния поляризации. Проведено сравнение шумовых характеристик рассматриваемых методов и проанализированы факторы, ограничивающие динамический диапазон передачи широкополосных сигналов на примере радиофотонной линии с удаленным внешним электрооптическим модулятором. Для волоконно-оптической линии длиной 1000 м показана возможность достижения динамического диапазона, свободного от нелинейных искажений третьего порядка $SFDR_3 \approx 116 \text{ dB Hz}^{-2/3}$, близкого к пределу, ограниченному дробовым шумом.

Ключевые слова: оптическая поляризация, поляризационный фединг, волоконно-оптические линии связи, оптический шум, динамический диапазон, балансное детектирование, радиофотоника, интегрально-оптический модулятор, поляризационный контроль.

DOI: 10.21883/JTF.2021.11.51537.94-21

Введение

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) широко используются для передачи аналоговых сигналов на большие расстояния, например, в распределенных системах волоконно-оптических датчиков [1] или системах радиофотоники [2]. Важнейшим параметром аналоговой ВОЛС является динамический диапазон [3], для расширения которого часто используются когерентные методы, основанные на интерференции оптических сигналов [4]. Интерференционный сигнал в таких системах зависит от состояния поляризации, изменение которого приводит к замираниям — так называемому поляризационному федингу [5]. Обычно для подавления поляризационного фединга используют специальное волокно с сохранением поляризации, обеспечивая одно постоянное состояние поляризации вдоль ВОЛС [6]. Данный подход приводит к значительному удорожанию ВОЛС и не позволяет использовать уже развернутые сети на основе стандартного волокна без сохранения поляризации. Эти ограничения становятся особенно критичны для массовых применений, таких как распределение сверхвысокочастотной (СВЧ) несущей по ВОЛС в телекоммуникационных сетях пятого и шестого поколения [7]. Для решения данной проблемы были разработаны различные методы компенсации поляризационного

фединга [8]. Например, в современных цифровых ВОЛС с дифференциальным квадратичным фазовым форматом модуляции (DQPSK) одновременно используются две ортогональные поляризации [9], а в системах волоконно-оптических датчиков применяют активную подстройку состояния поляризации оптического излучения при помощи контроллера поляризации (поляризационного скремблера) [10].

Задача настоящей работы заключалась в сопоставлении метода компенсации поляризационного фединга, использующего ортогональные поляризационные компоненты оптического излучения, с методом, основанным на активной подстройке состояния поляризации, с точки зрения вносимых шумов и достижимого динамического диапазона передачи аналоговых широкополосных сигналов.

1. Конфигурация ВОЛС с удаленным внешним модулятором

В качестве объекта исследований была выбрана радиофотонная линия с удаленным электрооптическим модулятором Маха–Цендера на основе оптических волноводов в ниобате лития (рис. 1, а). Данная конфигурация ВОЛС хорошо подходит для опроса удаленных

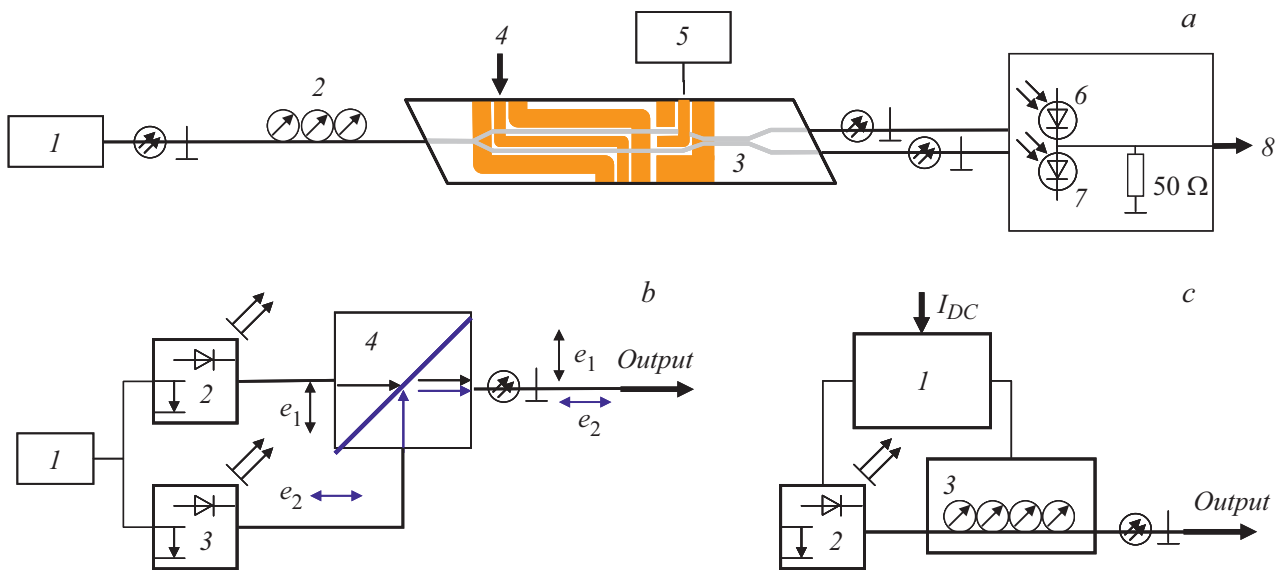


Рис. 1. *a* — структурная схема макета радиофотонной линии с удаленным внешним модулятором и балансным детектором. 1 — лазерный источник, 2 — ручной волоконно-оптический контроллер поляризации, 3 — МЦМ с двойным выходом, 4 — СВЧ вход, 5 — система стабилизации рабочей точки модулятора, 6, 7 — фотодиоды в составе балансного фотодетектора, 8 — СВЧ выход; *b* — структурная схема деполаризованного лазерного источника. 1 — управляющая электроника, 2, 3 — одночастотные лазерные диоды с распределенной обратной связью, 4 — поляризационный делитель/комбайнер; *c* — структурная схема лазерного источника с подстройкой поляризации. 1 — управляющая электроника, 2 — одночастотный лазерный диод, 3 — контроллер поляризации (скремблер).

антенных постов [11] распределенных систем приема радиосигналов, когда оборудование с высоким энергопотреблением в виде лазерного источника излучения и системы обработки СВЧ сигналов находится на базовой станции, а антенные посты в точках приема максимально разгружены и содержат только модулятор с системой стабилизации рабочей точки, энергопотребление которой может быть снижено до уровня 5 мВт или ниже [12], что позволяет запитать ее при помощи фотоэлектрического преобразователя от сигнального оптического излучения в телекоммуникационном диапазоне длин волн (1500–1600 нм) со средней мощностью менее 15 мВт.

Был использован специально разработанный модулятор Маха–Цендера с двойным выходом [11] с полосой частот модуляции $B = 20$ GHz, полувольтным напряжением $V_{\pi} \approx 5$ V и оптическими потерями $OL = 3.5$ dB. Модуляция оптического сигнала на разных выходах модулятора происходит в противофазе, что дает возможность применения балансного детектирования для подавления синфазных помех и шумов, таких как шум интенсивности лазерного источника (RIN). Кроме того, использование модулятора с двойным выходом в квадратурной рабочей точке обеспечивает выигрыш в коэффициенте передачи линии в 6 dB [3] по сравнению с линией без балансного детектирования со стандартным модулятором с одним выходом.

Именно интерферометр модулятора, изготовленный на основе двулучепреломляющего кристалла ниобата лития с тонкопленочным плазмон-поляритонным поля-

ризатором [13] на входе, выделяющим поляризационную TE моду, является в данной системе поляризационно-зависимым элементом, вызывающим поляризационный фединг, при использовании для доставки оптического излучения на вход модулятора стандартного волоконно-оптического кабеля на основе одномодового телекоммуникационного волокна (SMF 28) без сохранения поляризации. Длина волоконно-оптического кабеля составляла около 1000 м. Дополнительно перед модулятором был установлен ручной волоконно-оптический контроллер поляризации, позволяющий моделировать случайное изменение поляризации или задавать точное состояние поляризации на входе модулятора.

Передаваемый по ВОЛС при помощи амплитудной модуляции оптической несущей широкополосный аналоговый сигнал детектировался специально разработанным балансным фотоприемником. В балансном фотоприемнике были использованы бескорпусные чипы высокочастотных фотодиодов с полосой частот 10 GHz и максимальной чувствительностью около 0.6 A/W в телекоммуникационном диапазоне длин волн 1500–1600 нм. Чтобы повысить коэффициент передачи и снизить коэффициент шума ВОЛС выбирались фотодиоды с высоким током насыщения 30 mA, позволяющие использовать источники лазерного излучения с выходной оптической мощностью до 100 mW. Полоса частот детектируемого балансным фотоприемником сигнала составляла около 3 GHz и была ограничена точностью выравнивания оптических путей между выходами модулятора и фото-

диодами балансного фотоприемника. Относительная погрешность выравнивания оптических путей составляла 10^{-5} при длине волоконно-оптического кабеля между выходом модулятора и входом балансного фотоприемника около 1000 м. Для генерации оптической несущей использовались два вида лазерных источников: так называемый „деполяризованный“ источник оптического излучения [14], объединяющий в одном оптическом волокне излучение двух независимых лазерных диодов с ортогональными состояниями линейной поляризации, и источник на основе лазерного диода с контроллером состояния выходной поляризации и системой управления с обратной связью [15].

2. Характеристики ВОЛС с „деполяризованным“ источником

В „деполяризованном“ источнике оптического излучения (рис. 1, *b*) были использованы два мощных (100 мВт) одночастотных лазерных диода с распределенной обратной связью, излучение от которых в ортогональных линейных составляющих поляризации объединялось на входе ВОЛС при помощи волоконно-оптического поляризационного комбайнера (POBS-15-L-1, AFW Technologies) с коэффициентом поляризационной экстинкции $E > 25$ dB. Чтобы исключить попадание интермодуляционных составляющих ниже 5-го порядка в полосу частот передаваемых сигналов [15], выбранные лазерные диоды излучали на соседних частотах телекоммуникационной сетки ITU с разницей частот 100 GHz ($\lambda_1 = 1550.12$ nm, $\lambda_2 = 1550.92$ nm). Данная разница длин волн может использоваться для систем с полосой частот до 20 GHz. При точном выравнивании оптических мощностей лазерных диодов на выходе „деполяризованного“ источника постоянная составляющая оптической мощности, детектируемая балансным фотоприемником, не менялась даже при сильной поляризационной модовой дисперсии, моделируемой перестройкой контроллера поляризации перед модулятором, т.е. поляризационный фединг был подавлен. Однако измерения спектральной плотности шума методом Y-фактора [16] показали сильное влияние изменения состояния поляризационного контроллера на шумовые характеристики ВОЛС (рис. 2). Максимальные шумы наблюдаются, когда излучение лазерных диодов на входе модулятора имеет ортогональные линейные поляризации, ориентированные под углом 45° относительно поверхности и оптической оси кристаллической подложки интегрально-оптического модулятора. Максимальный рост уровня шума интенсивности „деполяризованного“ источника при прямом детектировании относительно шумов одного лазерного диода составляет около 8 dB. Источником данных шумов предположительно является интерференция основной линии генерации одного лазерного диода с сильно задавленными боковыми линиями второго лазерного диода. Эксперименты показали, что

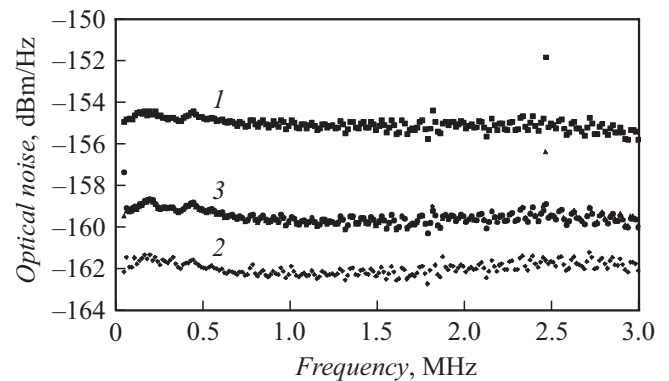


Рис. 2. Спектральные зависимости плотности мощности оптических шумов деполяризованного лазерного источника после прохождения модулятора (поляризующего элемента): 1 — прямое детектирование, ортогональные поляризационные компоненты ориентированы под углом 45° относительно поверхности и оптической оси кристаллической подложки интегрально-оптического модулятора; 2 — прямое детектирование, одна из ортогональных поляризационных компонент параллельна оптической оси кристаллической подложки интегрально-оптического модулятора; 3 — балансное детектирование при разных ориентациях ортогональных поляризационных компонентов.

данный вид шумов является синфазным и может быть эффективно подавлен балансным детектором до уровня, близкого к пределу дробового шума [17]:

$$N(f) = 10 \cdot \log(2qI_{DC}R|H(f)|^2) \approx -160 \text{ [dBm/Hz]}, \quad (1)$$

где $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C — заряд электрона, $I_{DC} \approx 20$ mA — постоянная составляющая суммарного тока фотодиодов, R — сопротивление нагрузки (обычно 50) и $H(f) \approx 0.5$ — спектральная передаточная функция фотодетектора. Достижимый динамический диапазон, свободный от нелинейных искажений, оценивается с использованием следующей теоретической формулы [3]:

$$\text{SFDR}_3 \text{ [dB} \cdot \text{Hz}^{-2/3}] = -8.7 + \frac{40}{3} \log(I_{DC} \text{ [mA]}) - \frac{2}{3} N \text{ [dBm/Hz]}, \quad (2)$$

и дает весьма высокое значение $\text{SFDR}_3 \approx 116 \text{ dB/Hz}^{-2/3}$ при использовании балансного детектирования. Значение динамического диапазона, вычисленное по формуле [3]:

$$\text{SFDR}_3 = \frac{2}{3} (174 + \text{OIP}_3 - G - \text{NF}), \quad (3)$$

с использованием результатов измерений по методу Y-фактора коэффициента передачи ВОЛС (G), коэффициента шума (NF) и точки пересечения третьего порядка (OIP_3), определенной двухтоновым методом [3], хорошо согласуются с теоретическими оценками по формуле (2) (рис. 3).

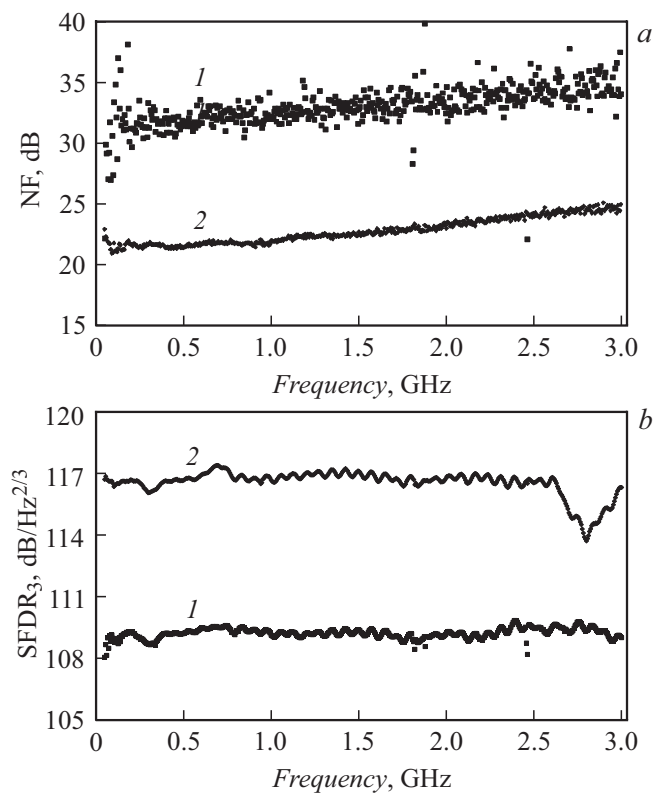


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента шума (а) и динамического диапазона (б) радиофотонной линии с деполаризованным лазерным источником: 1 — простое прямое детектирование, 2 — балансное детектирование.

Таким образом, исследования показали, что использование балансного детектирования позволяет снизить уровень шумов „деполяризованного“ источника до уровня, близкого к квантовому пределу дробового шума, повысить коэффициент передачи ВОЛС на 6 dB и как результат получить динамический диапазон ВОЛС выше $116 \text{ dB Hz}^{2/3}$. Без балансного детектирования, когда один из фотодиодов балансного детектора отключен, коэффициент передачи ВОЛС падает на 6 dB (в 4 раза, поскольку фототок падает в 2 раза), а шумы „деполяризованного“ источника становятся некомпенсированными, происходит рост коэффициента шума на 10 dB и сужение динамического диапазона на 7 dB, до уровня $109 \text{ dB Hz}^{-2/3}$. Необходимо отметить, что для эффективного подавления шумов в широком частотном диапазоне временная задержка сигнала между плечами балансного детектора должна быть меньше обратного значения максимальной частоты передаваемого широкополосного сигнала, которое составляет 300 ps для частотной полосы 3 GHz. Обеспечить малую задержку между плечами становится тем труднее, чем больше длина ВОЛС, что затрудняет подавление шумов в ВОЛС длиной более 1000 м.

3. Характеристики ВОЛС с источником с подстройкой поляризации

Во втором источнике оптического излучения также использовался мощный (100 mW) одночастотный лазерный диод с распределенной обратной связью, а для компенсации поляризационного фединга использовалась активная подстройка состояния поляризации (рис. 1, с), поддерживающая линейную поляризацию, соответствующую волноводной ТЕ-моду на входе интегрально-оптического модулятора. Такая подстройка была реализована при помощи специального устройства — управляемого контроллера поляризации (поляризационного скремблера), представляющего собой волоконные фазовые пластинки с температурным, либо пьезоэлектрическим управлением [18]. Была разработана электронная система управления контроллером поляризации с обратной связью, использующая постоянную составляющую тока балансного фотоприемника (I_{DC}) в качестве входного сигнала. Был разработан оригинальный алгоритм управления волновыми пластинками поляризационного скремблера, позволяющий избежать и эффективно выводить систему управления из „мертвых“ зон, связанных с конечной максимальной амплитудой управляющего напряжения [19]. Критерием выставления оптимального состояния поляризации на входе модулятора было максимальное значение постоянной составляющей фототока I_{DC} . Скорость реакции системы подстройки поляризации составляла около одной секунды, что достаточно для большинства применений, поскольку дрейф состояния поляризации в волоконно-оптическом кабеле обычно происходит гораздо медленнее с характерным временем изменения несколько минут [20]. Для проверки работоспособности системы подстройки состояния поляризации при помощи ручного волоконно-оптического контроллера поляризации имитировался поляризационный дрейф. Элемент соответствующий полуволновой пластинки медленно поворачивался во всем доступном диапазоне углов ($0-180^\circ$). Система оказалась способна поддерживать максимальную постоянную составляющую тока I_{DC} с относительной погрешностью 0.2% при вращении полуволновой пластинки со скоростью менее $5^\circ/\text{s}$. При более быстром дрейфе состояния поляризации постоянная составляющая тока I_{DC} начинала хаотически изменяться в широком диапазоне, что было обусловлено недостаточной скоростью системы автоматического регулирования. После прекращения вращения через несколько секунд система находила рабочую точку и захватывала ее, при этом постоянная составляющая тока I_{DC} снова устанавливалась в максимальное значение. Отметим, что данные ограничения были обусловлены скоростью системы обработки сигналов обратной связи, используемый поляризационный контроллер дает возможность управления состоянием поляризации с характерным временем $\sim 1 \text{ ms}$. Измерение шумовых характеристик показало,

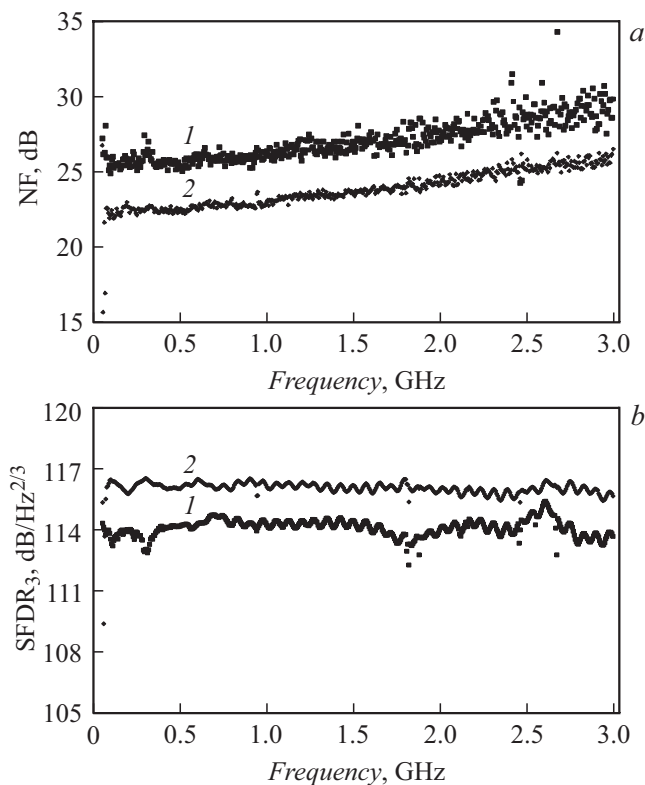


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента шума (а) и динамического диапазона (б) радиофотонной линии с лазерным источником с подстройкой поляризации: 1 — простое прямое детектирование, 2 — балансное детектирование.

что система управления состоянием поляризации практически не вносит дополнительных шумов. Экспериментально измеренные коэффициенты шума при прямом детектировании на одном фотодиоде и при балансном детектировании (рис. 4, а) не менялись при внешних изменениях состояния поляризации в волоконно-оптическом кабеле, когда система подстройки поляризации работала в штатном режиме и успевала компенсировать поляризационный дрейф. Низкий уровень шумов при детектировании одним фотодиодом достигался благодаря низкому уровню шума интенсивности используемого мощного лазерного диода ($RIN < -160$ dBc/Hz). Небольшое сужение динамического диапазона (рис. 4, б) до 114 dB Hz $^{-2/3}$ при детектировании одним фотодиодом было обусловлено уменьшением коэффициента передачи на 6 dB.

Заключение

Были исследованы два типа лазерных источников, позволяющих скомпенсировать поляризационный фидинг в аналоговых ВОЛС на основе стандартного волокна без сохранения поляризации. Источник на основе поляризационного объединения излучения двух лазерных диодов с ортогональной линейной поляризацией эффек-

тивно компенсирует поляризационный фидинг, однако имеет поляризационно-зависимые шумы, которые могут быть подавлены при использовании балансного детектирования. Для ВОЛС с данным источником экспериментально продемонстрирован динамический диапазон, свободный от нелинейных искажений третьего порядка $SFDR_3 \approx 116$ dB Hz $^{-2/3}$, близкий к теоретическому пределу, обусловленному дробовым шумом. Высокие требования к точности выравнивания оптических путей затрудняют применение балансного детектирования в ВОЛС большой длины. Источник на основе лазерного диода с системой подстройки поляризации позволяет эффективно компенсировать медленные уходы состояния поляризации (с характерными для большинства практических применений временами более 1 s) и не вносит дополнительных поляризационно-зависимых шумов, что делает его предпочтительным для ВОЛС большой длины (более 1000 m). При использовании мощного (100 mW) одночастотного лазерного диода с распределенной обратной связью, обеспечивающего низкий относительный шум интенсивности, динамический диапазон ВОЛС с лазерным источником с активным контролем поляризации лишь на 2 dB меньше при простом прямом детектировании по сравнению с детектированием балансным фотодетектором.

Полученные результаты определили условия применимости рассмотренных методов компенсации поляризационного фидинга в ВОЛС с удаленным отдельно стоящим внешним электрооптическим модулятором, и показали принципиальную достижимость уровня шумов ограниченного фундаментальным квантовым пределом дробового шума.

Благодарности

В Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого работа была поддержана в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2020-0024).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] G. Rajan. *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications* (CRC press, Boca Raton, 2015)
- [2] W.S.C. Chang. *RF Photonics Technology in Optical Fiber Links* (Cambridge University Press, Cambridge, 2002)
- [3] В.Д. Урик, Д.Д. Мак-Кини, К.Д. Вильямс. *Основы микроволновой фотоники* (Техносфера, М., 2016) [V.J. Urick, D.J. Mc Kinney, K.J. Williams. *Fundamentals of microwave photonics* (John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2015)]
- [4] В.М. Петров, А.В. Шамрай. *Интерференция и дифракция для информационной фотоники* (Лань, СПб., 2019)

- [5] M. Ni, H. Yang, S. Xiong, Y. Hu. *Appl. Opt.*, **45** (11), 2387 (2006). DOI: 10.1364/AO.45.002387
- [6] M.E. Froggatt, D.K. Gifford, S. Kreger, M. Wolfe, B.J. Soller. *J. Lightwave Technol.*, **24** (11), 4149 (2006). DOI: 10.1109/JLT.2006.883607.
- [7] R. Waterhouse, D. Novak. *IEEE Microwav. Mag.*, **16** (8), 84 (2015). DOI: 10.1109/MMM.2015.2441593
- [8] N.G. Walker, G.R. Walker. *J. Lightwave Technol.*, **8** (3), 438 (1990). DOI: 10.1109/50.50740
- [9] K. Kitayama, A. Maruta, Y. Yoshida. *J. Lightwave Technol.*, **32** (20), 3411 (2014). DOI: 10.1109/JLT.2014.2310461
- [10] A.D. Kersey, M.J. Marrone, A. Dandridge. *J. Lightwave Technol.*, **8** (6), 838 (1990). DOI: 10.1109/50.54500
- [11] A. Petrov, E. Velichko, V. Lebedev, I. Ilichev, P. Agruzov, M. Parfenov, A. Varlamov, A. Shamrai. In: O. Galinina, S. Andreev, S. Balandin, Y. Koucheryavy (eds) *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2019, ruSMART 2019. Lecture Notes in Computer Science* (Springer, Cham, 2019), v. 11660, p. 727. DOI: 10.1007/978-3-030-30859-9_64
- [12] A. Petrov, A. Tronev, P. Agruzov, A. Shamrai, V. Sorotsky. *Electronics*, **9** (11), 1861 (2020). DOI: 10.3390/electronics9111861
- [13] И.В. Ильичев, Н.В. Тогузов, А.В. Шамрай. *Письма в ЖТФ*, **35** (18), 97 (2009) [I.V. Il'ichev, N.V. Toguzov, A.V. Shamray. *Tech. Phys. Lett.*, **35** (9), 831 (2009). DOI: 10.1134/S1063785009090132]
- [14] W.K. Burns, R.P. Moeller, C.H. Bulmer, A.S. Greenblatt. *Opt. Lett.*, **16** (6), 381 (1991). DOI: 10.1364/OL.16.000381
- [15] T. Okoshi. *J. Lightwave Technol.*, **3** (6), 1232 (1985). DOI: 10.1109/JLT.1985.1074336
- [16] С. Бельчиков. *Компоненты и технологии*, **4**, 196 (2008).
- [17] M.S. Islam, T. Chau, S. Mathai, T. Itoh, M.C. Wu, D.L. Sivco, A.Y. Cho. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **47** (7), 1282 (1999). DOI: 10.1109/22.775467
- [18] W.H.J. Aarts, G.D. Khoe. *J. Lightwave Technol.*, **7** (7), 10333 (1989). DOI: 10.1109/50.29630
- [19] M. Martinelli, R.A. Chipman. *J. Lightwave Technol.*, **21** (9), 2089 (2003). DOI: 10.1109/JLT.2003.816835
- [20] M. Martinelli, P. Martelli, S. M. Pietralunga. *J. Lightwave Technol.*, **24** (11), 4172 (2006). DOI: 10.1109/JLT.2006.884228