

Ассиметричный по частоте двухполосный оптический векторный анализатор спектра

Р.А. Нуруллин, Р.Р. Самигуллин, Т.Р. Сахбиев

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н.Туполева – КАИ*

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы теоретического обоснования и компьютерного моделирования оптического векторного анализатора спектра на основе асимметричной оптической двухполосной модуляции с использованием параллельного двухканального модулятора Маха-Цендера. Предлагаемый метод и устройство позволяют достичь удвоенного диапазона измерения по сравнению с классическим оптическим векторным анализатором на основе однополосной модуляции и реализовать более простую и более надежную конфигурацию по сравнению с ранее представленным асимметричным по амплитуде оптическим векторным анализатором с двумя боковыми полосами. Может быть получена возможность измерения частотных характеристик волоконной брэгговской решетки шириной до 0,5 нм (60 ГГц) с разрешением до 1 МГц (около 5-10 фм) с использованием электрооптических модуляторов с шириной полосы пропускания до 30 ГГц.

Ключевые слова: оптический анализатор спектра, двухчастотная модуляция, асимметрия по частоте, диапазон измерений, волоконная брэгговская решётка.

Введение

Системы оптической связи развиваются в сторону более высоких скоростей передачи и плотности каналов, а количество компонентов в типичной системе увеличивается. Эти тенденции создают потребность в методах измерения частотных и поляризационных характеристик компонентов, которые одновременно являются оперативными, точными и комплексированными по типу измеряемых характеристик. Для сетей с высокими скоростями передачи данных требуются компоненты с высокими требованиями по поляризационно-модовой и хроматической дисперсиям. Однако компоненты, используемые в системах с уплотнением по длине волн,

часто имеют большие дисперсионные флуктуации на длинах волн всего в десятки пикометров [1]. Точные знания характеристик различных волоконно-оптических компонентов необходимы для оптимизации свойств этих устройств на стадии производства и разработки современных оптических сетей. Производительность оптической системы связи может ухудшиться, если свойства оптических элементов не соответствуют требованиям. По мере увеличения количества этих компонентов в сетях отдельные компоненты должны удовлетворять все более жестким требованиям как для частотных, так и поляризационных оптических параметров. Следовательно, компонент должен быть точно и комплексно охарактеризован, прежде чем он может быть установлен в сети. К указанным частотным и поляризационным параметрам относятся: потери, в том числе поляризационные [2], хроматическая и поляризационно-модовая дисперсия [3], спектральные неравномерности и т.д.

В данной статье рассматривается ассиметричный по частоте двухполосный оптический векторный анализатор спектра. Основным предметом обсуждения будет являться компьютерное моделирование в программной среде OptiSystem частотной асимметрии оптической двухполосной модуляции с использованием двухканального модулятора Маха-Цендера. Предварительно представлена информация о методе оптического векторного анализа, основанного на двухполосной модуляции с частотной асимметрией, его преимуществах по сравнению с методами, использующими однополосную модуляцию [4-7].

1. Теоретическое обоснование метода спектрального анализа

На рис. 1 показана конфигурация предлагаемого оптического векторного анализатора спектра на основе двухполосного зондирования оптического компонента [8, 9].

Световая волна с угловой частотой ω_0 от перестраиваемого лазерного источника отправляется в двухканальный модулятор Маха-Цендера, в котором она разделяется на две части. Одна часть модулируется радиочастотным сигналом с частотой ω_e в ММЦ1, генерируя оптический сигнал с двойной боковой полосой, имеющий две боковые полосы с частотами $\omega_0 - \omega_e$ и $\omega_0 + \omega_e$ соответственно и подавленную несущую (рис. 1,б (А)). При этом используется модуляция по методу Ильина-Морозова, представленная в работах [10-13].

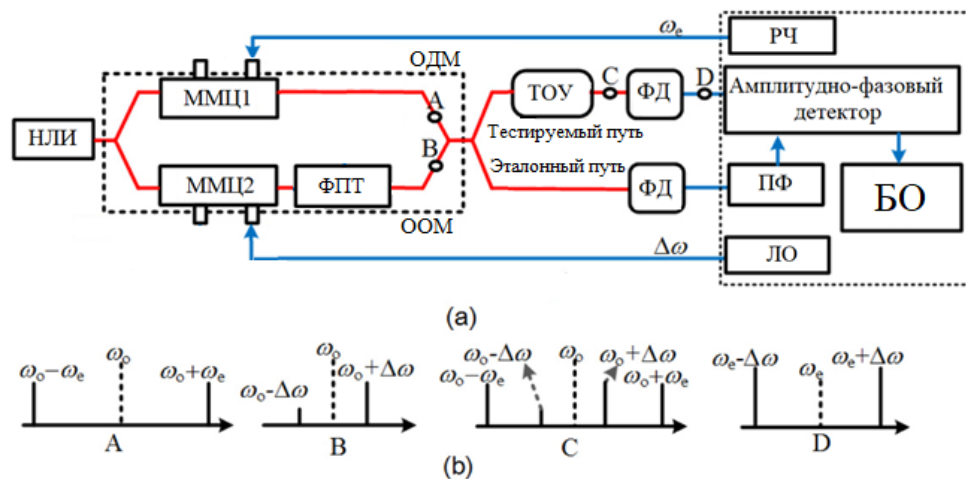


Рис. 1. – Оптический векторный анализатор на основе асимметричного по частоте двухполосного зондирования с указанием структурной схемы (а) и спектров сигналов в разных точках схемы (б):

НЛИ – настраиваемый лазерный источник; ММЦ – модулятор Маха-Цендера; ДПММЦ – двухканальный параллельный модулятор Маха-Цендера; ТОУ – тестируемое оптическое устройство; ФД – фотодетектор; ПФ – полосовой фильтр; РЧ – радиочастотный генератор модулирующей частоты; ОДМ - оптическая двухполосная модуляция; ООМ – оптическая однополосная модуляция; БО – блок обработки; ЛО – локальный осциллятор; ФПТ – фильтр с АЧХ в виде прямоугольной трапеции

Другая часть модулируется сигналом локализованного гетеродина с частотой $\Delta\omega$ в ММЦ2. Для получения сигнала оптической одиночной боковой полосы (рис. 1,б (В)) излучение пропускается через фильтр ФПТ с

АЧХ в форме прямоугольной трапеции. Требуемая боковая полоса первого порядка имеет частоту $\omega_0 + \Delta\omega$ и лежит на плоской вершине трапецеидальной АЧХ. Практически подавленная (не нужная) боковая полоса имеет частоту $\omega_0 - \Delta\omega$ и лежит на склоне ФПТ.

На выходном порту двухпараллельного двухканального модулятора Маха-Цендера две части излучения объединяются (рис. 1,б (С)) для формирования оптического сигнала двойной боковой полосы со сдвигом несущей (рис. 1,б (D)).

2. Моделирование метода в программной среде OptiSystem

На рис. 1 показана собранная в OptiSystem схема оптического векторного анализатора, соответствующая структурной схеме, представленной на рис. 1, а.

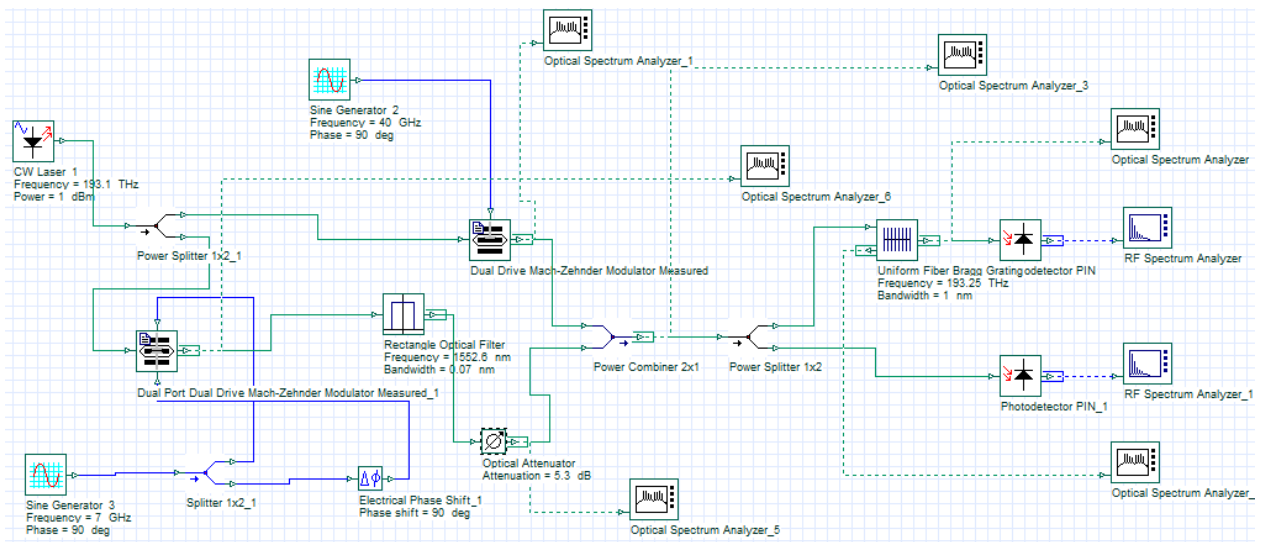


Рис. 2. – Модельная схема оптического векторного анализатора спектра

В качестве источника сигнала используется DFB-лазер мощностью 1 мВт работающий на частоте 193.1 ТГц (1552.5 нм) и шириной линии излучения в 1 МГц.

Далее представлены графики, полученные в характерных точках оптического векторного анализатора спектра.

На рис. 3 представлен график после модулирования радиочастотным сигналом с частотой ω_p в ММЦ1, генерируется оптический сигнал с двумя боковыми полосами с частотами $\omega_0 - \omega_p$ и $\omega_0 + \omega_p$ соответственно.

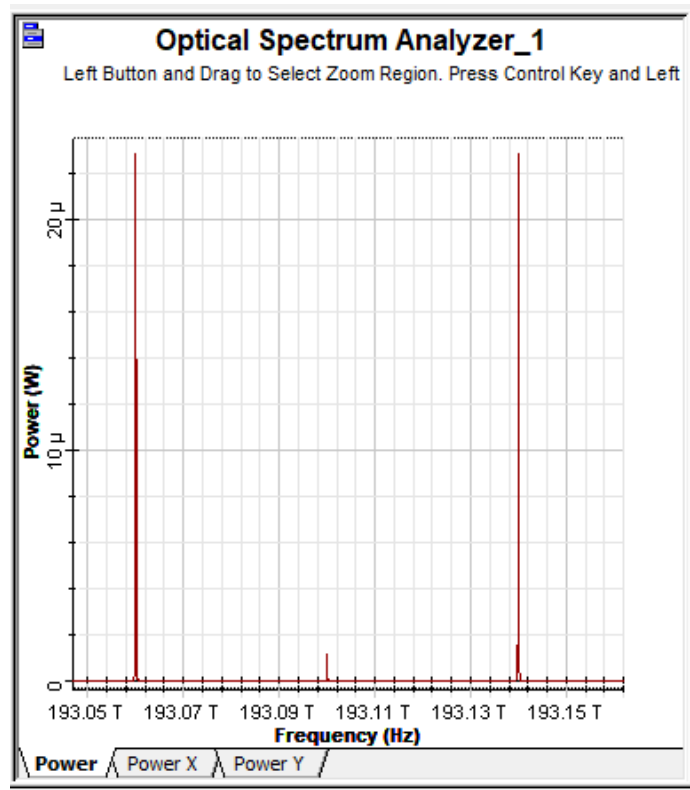


Рис. 3. – Спектр сигнала после MZM1, частота разноса 40 ГГц.

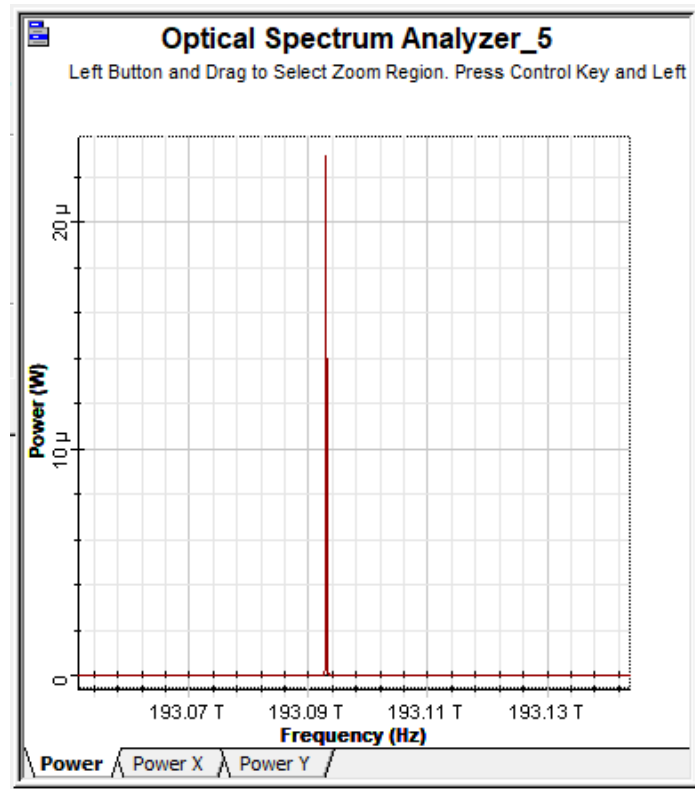


Рис. 4 – Спектр сигнала после MZM2 и ФПТ на частоте 1 ГГц

На рис. 5 показан спектр после прохождения сигнала через ТОУ.

В качестве ТОУ выбрана ВБР с плоской вершиной.

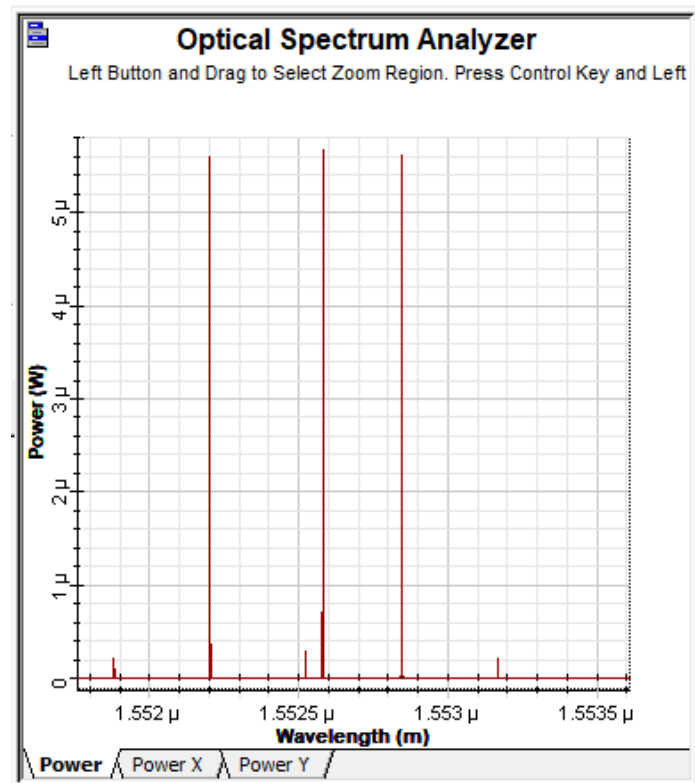


Рис. 5. — Спектр сигнала на выходе ТОУ

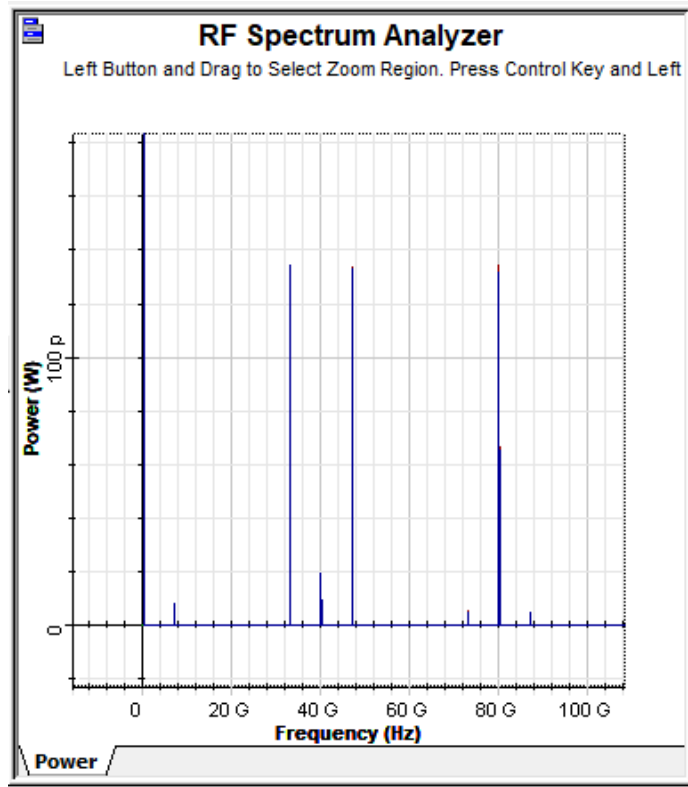


Рис. 6. – Спектр сигнала на выходе фотодетектора

Интересующие нас составляющие находятся в середине рис. 6 и демонстрируют перенос спектра на частоту 40 ГГц уже электрического, а не оптического спектра, которая далее обрабатывается электронным векторным анализатором спектра.

Основное преимущество такой обработки заключается в возможности расширения динамического диапазона измерений в два раза. При этом спектральные составляющие, разнесенные на ± 40 ГГц (80 ГГц) в оптике, обрабатываются на частоте 40 ГГц в микроволновом диапазоне.

Кроме того, не полностью подавленные несущая и боковые полосы более высокого порядка игнорируются, поскольку биения, создаваемые несущей частотой с частотным сдвигом без него, имеют разные частоты. Паразитные частоты сигналов отличаются от частот, представляющих интерес, и их можно легко удалить на этапе обработки сигнала.

3. Анализ частотных характеристик ВБР

Огибающую спектра ВБР (гауссовский контур) по отражению R , выраженную через расстройку δ , можно определить как [14]:

$$R = \frac{\sinh^2 \left[\kappa L \sqrt{1 - (\delta/\kappa)^2} \right]}{\cosh^2 \left[\kappa L \sqrt{1 - (\delta/\kappa)^2} \right] - (\delta/\kappa)^2}, \quad (1)$$

где (δ/κ) – относительная расстройка при $\delta = \Omega - (\pi/\Lambda)$, где $\Omega = 2\pi n_{eff}/\lambda$.

Спектральная ширина резонанса однородной решётки на полувысоте (FWHM) может быть выражена следующим приближенным соотношением:

$$\Delta\lambda_{FWHM}^{BG} \approx 2\lambda_{BG}\gamma \sqrt{\left(\eta_{BG} \Delta n_{mod} / 2n_{eff} \right)^2 + (\Lambda/L)^2}, \quad (2)$$

где γ – параметр порядка единицы для глубоких решёток (с коэффициентом отражения $R \sim 1$) и порядка 0,5 для решёток небольшой глубины.

Фазовая характеристика ВБР $\theta(\lambda)$ определяется через относительную групповую задержку $\Delta\tau(\lambda)$:

$$\Delta\tau(\lambda) = -\frac{n_{eff} \lambda_{BG}^2}{2\pi c} \frac{\partial\theta}{\partial\lambda}. \quad (3)$$

Рассчитанные по (1) и (3) формы амплитудной по пропусканию и фазовой характеристик ВБР, а также отмоделированные при реализации ОВА в пакете Optiwave system показаны на рис. 2 разными типами линий.

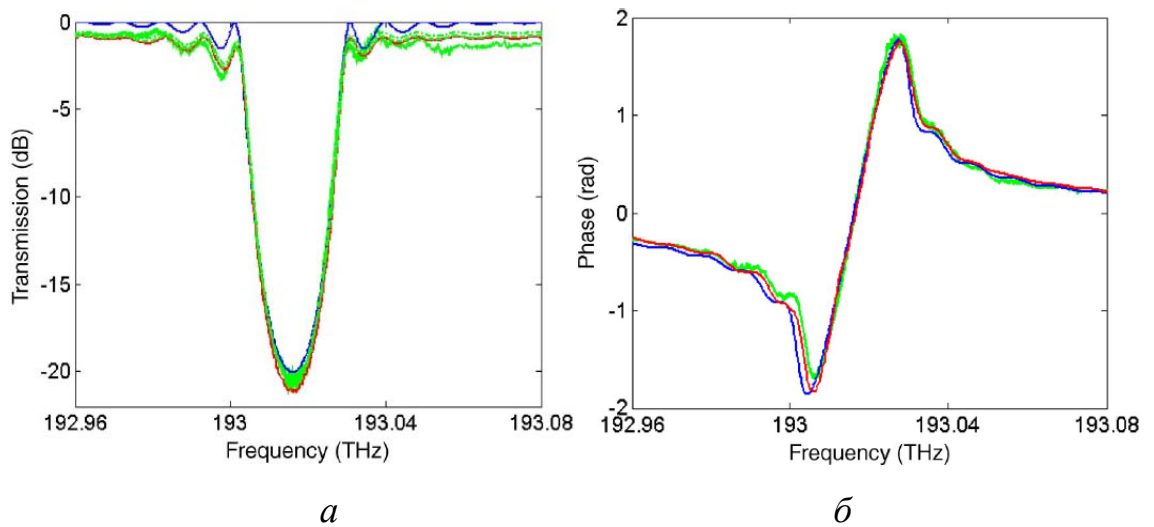


Рис. 7. – Характеристики ВБР: амплитудная по пропусканию (а) и фазовая (б)

Разрешающая способность измерений определялась шириной линии излучения примененного лазера, которая составила 1 МГц.

Заключение

Мы рассмотрели оптический векторный анализатор на основе асимметричной по частоте оптической двухполосной модуляции с использованием двухканального модулятора Маха-Цендера. Приведена информация о данном методе, о его принципе работы, продемонстрирована структурная и модельная схемы, рассмотрена математическая составляющая метода при анализе ВБР, проведена теоретическая компьютерная реализация метода с приведением графиков в характерных точках схем.

Амплитудные и фазовые характеристики выбранной ВБР в частотном диапазоне 80 ГГц получены с разрешением менее 1 МГц. Исследовались влияние нежелательных составляющих не до конца подавленной несущей частоты и паразитных составляющих более высоких частот на точность измерения. Показано, что нежелательные составляющие формируют частоты

биений, отличные по частоте от сдвинутой несущей, и таким образом могут быть легко удалены при анализе электронным векторным анализатором.

Литература

1. T. Niemi, M. Uusimaa, H. Ludvigsen. Limitations of phaseshift method in measuring dense group delay ripple of fiber Bragg gratings // IEEE Photonics Technol. 2001. №12 (13). pp. 1334–1336.
 2. G. D. VanWiggeren, A. R. Motamedi, D. M. Barley. Single-scan interferometric component analyzer // IEEE Photonics Technol. 2003. №15 (2). pp. 263–265.
 3. P. Yves, A. Maryse, B. Guillaume, P. Marie-Josée. Ultra-narrowband notch filtering with highly resonant fiber bragg gratings // Optical Society of America. 2010. P. BTuC3.
 4. S. Grudinin, V. S. Ilchenko, L. Maleki. Ultrahigh optical Q factors of crystalline resonators in the linear regime // Phys. Rev. A 74(6). 2006. Doi: 063806.
 5. E. Voges, O. Ostwald, B. Schiek, A. Neyer. Optical phase and amplitude measurement by single sideband homodyne detection // IEEE J. Quantum Electron. 1982. №18 (1). pp. 124–129.
 6. J. E. Román, M. Y. Frankel, R. D. Esman. Spectral characterization of fiber gratings with high resolution // Opt. Lett. 1998. №23 (12). pp. 939–941.
 7. T. Kawanishi, T. Sakamoto, and M. Izutsu. Optical filter characterization by using optical frequency sweep technique with a single sideband modulator // IEICE Electron. 2006. №Express 3(3). pp. 34–38.
 8. M. Wang and J. P. Yao. Optical vector network analyzer based on unbalanced double-sideband modulation with improved measurement accuracy // IEEE Photonics Technol. 2013. № Lett. 25(8), pp. 753–756.
-

9. Ting Qing, Shupeng Li, Min Xue, Wei Li, Ninghua Zhu, Shilonng Pan. Optical vector analysis based on asymmetrical optical double-sideband modulation using adual-drive dual-parallel Mach-Zehnder modulator // Optics Express. 2017. №Vol. 25, № 5. pp. 4665-4671.

10. А.А. Кузнецов, О.Г. Морозов. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей// Инженерный вестник Дона, 2017, № 3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343

11. О.Г. Морозов, И.И. Нуреев. Модуляционные методы формирования спектрально чистого двухканального полигармонического излучения с одинаковой разностной частотой и поляризационным мультиплексированием// Инженерный вестник Дона, 2017, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4587

12. И.И. Нуреев. Радиофотонные амплитудно-фазовые методы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // Инженерный вестник Дона, 2016, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581.

13. И.И. Нуреев. Сенсорные пассивные оптические сети и ключевые вопросы применения в них волоконных брэгговских решеток// Инженерный вестник Дона, 2016, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3605

14 Васильев С.А. и др. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 12. С. 1085-1103.

References

1. T. Niemi, M. Uusimaa, H. Ludvigsen. IEEE Photonics Technol. 2001. №12(13). pp. 1334–1336.

2. G. D. VanWiggeren, A. R. Motamedi, D. M. Barley. IEEE Photonics Technol. 2003. №15 (2). pp. 263–265.

3. P. Yves, A. Maryse, B. Guillaume, P. Marie-Josée. Optical Society of America. 2010. P. BTuC3.
4. I. S. Grudinin, V. S. Ilchenko, L. Maleki. A 74(6). 2006. Doi: 063806.
5. E. Voges, O. Ostwald, B. Schiek, A. Neyer. IEEE J. Quantum Electron. 1982. №18 (1). pp. 124–129.
6. J. E. Román, M. Y. Frankel, R. D. Esman. Opt. Lett. 1998. №23 (12). pp. 939–941.
7. T. Kawanishi, T. Sakamoto, and M. Izutsu. IEICE Electron. 2006. №Express 3(3). pp. 34–38.
8. M. Wang and J. P. Yao. IEEE Photonics Technol. 2013. № Lett. 25(8), pp. 753–756.
9. Ting Qing, Shupeng Li, Min Xue, Wei Li, Ninghua Zhu, Shilonng Pan. Optics Express. 2017. №Vol. 25, No. 5. pp. 4665-4671.
10. A.A. Kuznecov, O.G. Morozov. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343
11. О.Г. Морозов, И.И. Нуреев. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4587
12. I.I. Nureev. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581.
13. I.I. Nureev. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3605
14. Vasil'ev S.A. i dr. Kvantovaya ehlektronika. 2005. T. 35. № 12. pp. 1085-1103.