

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОФОТОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВЕКТОРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НОВОГО ТИПА

А.А. Кузнецов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. Рассматриваются существующие методы построения оптических векторных анализаторов интерферометрического и радиофотонного типов, выявлены факторы, ограничивающие повышение их метрологических характеристик. На базе проведенного системного анализа предложена: новая концепция радиофотонного оптического векторного анализа (РФ ОВА) на основе перестраиваемого многочастотного зондирующего излучения, названного « N -мерным компрессированным зондирующим излучением»; принципы построения таких анализаторов, а также описана обобщенная математическая модель взаимодействия N -мерного компрессированного зондирующего излучения с избирательной волоконно-оптической структурой.

Ключевые слова: оптический векторный анализатор, радиофотоника, трехчастотное излучение.

Общие подходы к построению оптических векторных анализаторов

Одним из ключевых элементов любого фотонного устройства являются оптические фильтры (ОФ). Современные технологии позволяют формировать как сверхузкополосные (с шириной в фемтометры), так и сверхширокополосные (десятки нанометров) ОФ. Актуальной становится задача измерения их амплитудных и фазовых характеристик (АЧХ и ФЧХ). Для таких измерений применяются векторные анализаторы, способные, в отличие от классических анализаторов спектра, измерять дополнительно фазовые и поляризационные характеристики оптических устройств. Следует отметить, что помимо фильтров, аналогичные АЧХ и ФЧХ имеют большинство видов волоконно-оптических датчиков.

Основной принцип измерения заключается в подаче на тестируемое устройство известного гармонического колебания и анализе отраженного (реже – прошедшего) сигнала путем определения его амплитуды (в измерительном канале) и фазы (совместно с опорным каналом). Используя полученные значения, можно определить следующие основные характеристики оптического устройства: внесимое затухание, поляризационно-зависимые потери (polarization-dependent loss – PDL), групповую задержку, дисперсию (хроматическую и поляризационно-модовую).

Для описания передаточной характеристики оптического устройства с учетом его поляризационных свойств чаще всего используют формализм Джонса [1]. В этом случае оптическая волна описывается вектором Джонса в виде:

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x \cdot e^{i\delta_x} \\ \alpha_y \cdot e^{i\delta_y} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $E_x = \alpha_x \cdot \varepsilon^{i\delta x}$ – колебание электрической составляющей поля по оси X с амплитудой α_x и фазой δ_x , $E_y = \alpha_y \cdot \varepsilon^{i\delta y}$ – колебание электрической составляющей поля по оси Y с амплитудой α_y и фазой δ_y . Вид эллипса поляризации представлен на рис. 1.

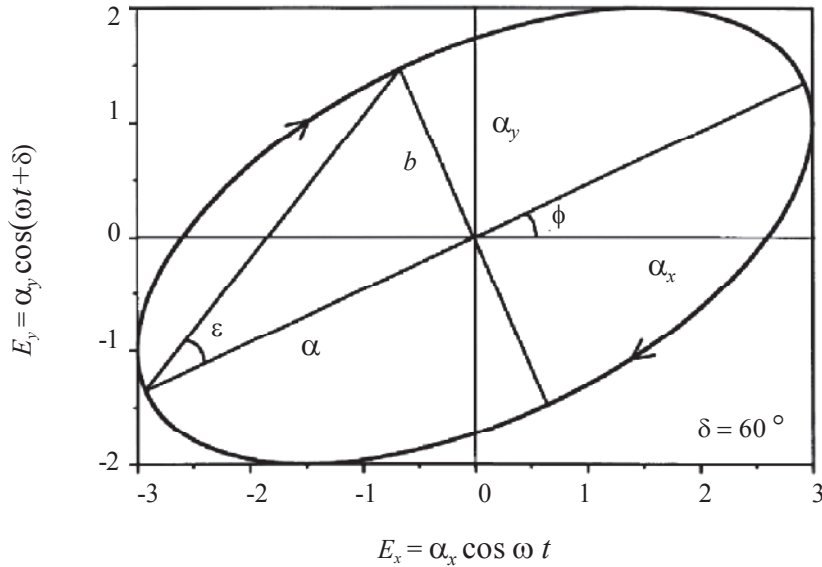


Рис. 1. Эллипс поляризации электромагнитной волны

Связь выходного и входного колебания, проходящего через оптическое устройство, осуществляется через передаточную матрицу – матрицу Джонса:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{yx} & r_{yy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где r_{ij} – скалярные передаточные функции тестируемого устройства в направлении $i-j$, измеренные на определенной длине волны ω .

Для вычисления указанных характеристик оптических компонент изначально определяют его матрицу Джонса путем измерения амплитудных и фазовых характеристик передаточных коэффициентов, далее на ее основе вычисляют искомые параметры [1]:

- вносимые потери (insertionloss – IL) – отношение выходной и входной мощности (интегральное), выраженное в дБ:

$$IL = 10 \cdot \log \left(\frac{\sum_{i,j} |r_{i,j}|^2}{2} \right); \tag{3}$$

- групповая задержка (groupdelay – GD) – изменение фазы оптической несущей, отнесенное к изменению ее частоты $\Delta\omega$:

$$GD_i = \frac{\arg(r_{xx_{i+1}} \cdot r_{xx_i}^* + r_{xy_{i+1}} \cdot r_{xy_i}^* + r_{yx_{i+1}} \cdot r_{yx_i}^* + r_{yy_{i+1}} \cdot r_{yy_i}^*)}{\Delta\omega}; \tag{4}$$

• хроматическая дисперсия (*chromatic dispersion – CD*) – производная групповой задержки по длине волны оптического излучения:

$$CD_i = \frac{GD_{i+1} - GD_i}{\Delta\lambda}, \tag{5}$$

• поляризационно-модовая дисперсия (*polarization mode dispersion – PMD*) – максимальная разница в групповых задержках по всем состояниям поляризации:

$$PMD_i = \left| \frac{\arg \left(\frac{\rho_{i,1}}{\rho_{i,2}} \right)}{\Delta\omega} \right|, \tag{6}$$

где $\rho_{i,1}$ и $\rho_{i,2}$ – собственные значения матриц J_{i+1} и J_i^{-1} соответственно.

Среди существующих коммерческих устройств стоит отметить оптический векторный анализатор OVA 5000 (производитель Luna, США).

Принцип его действия основан на сканировании тестируемого устройства одночастотным перестраиваемым излучением [2].

Упрощенная структурная схема представлена на рис. 2.

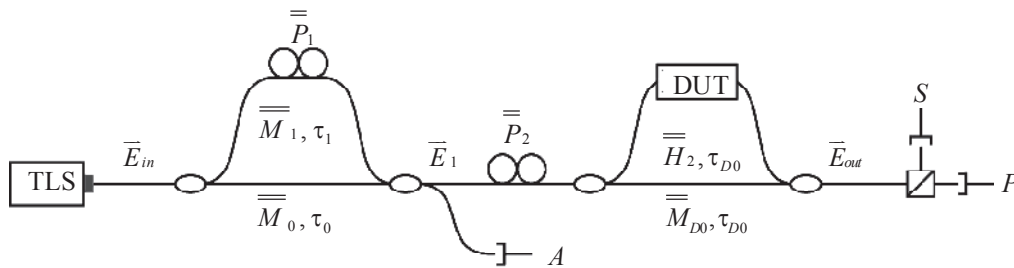


Рис. 2. Упрощенная структурная схема OVA 5000 [2]:
 □ – Polariz. Beam Splitter; ∞ – Polariz. Controller; ○ – 50/50 Coupler

Данный анализатор относится к классу одночастотных – источником зондирующего излучения является перестраиваемый лазерный диод (TLS) типа PHONIX 1000 с рабочим спектральным диапазоном 1525-1610 нм и шириной линии 500 Гц. Для снижения фазовых ошибок измерительное и опорное плечо выполнены в виде интерферометров. Для разделения поляризационных составляющих используется поляризационный делитель (PBS).

Основные технические характеристики представлены в таблице.

Характеристики OVA 5000

Параметр	Значение
Рабочий спектральный диапазон, нм	1525-1610
Погрешность / чувствительность измерения длины волны, пм	1,5 / 0,1
Погрешность измерения фазы, рад	0,0075
Погрешность / чувствительность измерения затухания, дБ	0,05 / 0,002
Погрешность измерения хроматической дисперсии, пс/нм	5
Диапазон / погрешность измерения, пс: групповой задержки; ПМД	6000 / 0,1 6000 / 0,08
Скорость перестройки лазера, нм/с	70
Выходная мощность лазера, мВт, не более	10

Из данных таблицы видно, что для сканирования сверхзаклопосных структур разрешающей способности современных ОВА недостаточно, поэтому целесообразно рассмотреть пути улучшения их метрологических характеристик.

Одним из факторов, ограничивающих улучшение метрологических характеристик, является работа фотоприемных устройств анализаторов в режиме измерения постоянного или квазипостоянного (сверхширокополосного) сигнала, что в свою очередь приводит к высокому уровню собственных шумов. Это связано с тем, что для зондирования тестируемого устройства (ТУ) используется перестраиваемый по длине волны высококогерентный одночастотный лазерный источник. Решение данной проблемы – переход к детектированию сигналов биений нескольких зондирующих оптических составляющих на радиочастоте, что сужает рабочую полосу фотоприемника и увеличивает отношение сигнал/шум. Такие векторные анализаторы принято называть радиофотонными (РФ ОВА).

В зависимости от типа зондирующих излучений РФ ОВА можно классифицировать:

- на двухчастотные симметричные и несимметричные;
- трехчастотные симметричные и несимметричные;
- полигармонические.

Простейшими РФ ОВА являются двухчастотные симметричные. В качестве источника зондирующих сигналов применяют либо модуляторы Маха – Цандера (ММЦ), работающие в нулевой рабочей точке, либо фазовые модуляторы и режекторные фильтры, подавляющие несущую. Основным недостатком таких источников излучений является наличие не до конца подавленных составляющих высокого порядка, дающих биения на той же частоте, что и информационные составляющие, непосредственно зондирующие контур (рис. 3).

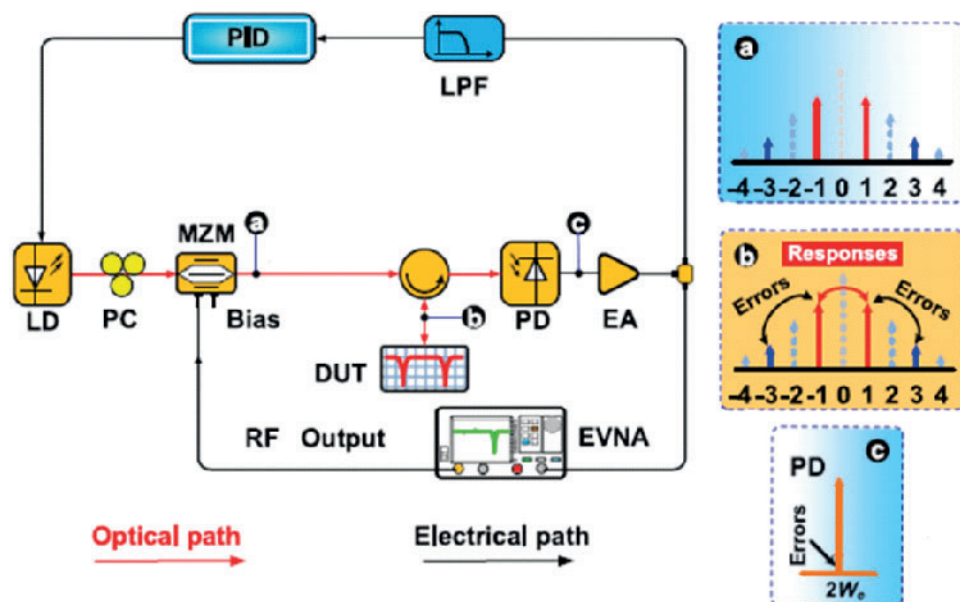


Рис. 3. Двухчастотный симметричный РФ ОВА [3]

Для устранения указанного недостатка существуют два подхода: внесение асимметрии в исходный зондирующий сигнал либо использование тандемной амплитудно-фазовой модуляции (ТАФМ) для генерации зондирующего излучения. В первом случае искусственно вво-

дится асимметрия в амплитуды сканирующего сигнала или производятся последовательные измерения на двух (или более) разностных частотах. Данный подход подразумевает проведение нескольких измерений, что приводит к усложнению схемы формирования сигнала и в результате не дает существенного выигрыша. Применение ТАФМ позволяет значительно подавить несущую, а структура зондирующего сигнала такова, что информационный сигнал и биения гармоник более высокого порядка не равны, т.е. исключается их вклад в общую погрешность измерения [4-5].

Общий недостаток двухчастотных РФ ОВА – при вычислении амплитуд зондирующих составляющих в силу их коммутативности невозможно однозначно соотнести со значениями частот. Для однозначного соотнесения необходимо либо измерять фазу сигнала биений, либо использовать дополнительные зондирующие составляющие. На практике чаще применяется второй подход.

В работе [6] представлен РФ ОВА на основе трехчастотного зондирующего излучения. Для упрощения данного метода была предложена следующая концепция: формировать зондирующее излучение таким образом, чтобы после прохождения тестируемого устройства его гармоники изменялись пропорционально на одну и ту же величину (с точностью до погрешности измерения). Такое возможно, если взаимное отношение крутизны АЧХ тестируемого устройства и разнос частот будут подобраны таким образом, что зондирующее излучение будет попадать на «плоскую» (в данном масштабе разности частот) часть контура.

Предложенный подход в сравнении с существующими трехчастотными анализаторами имеет следующие отличительные особенности:

- сокращается размерность системы уравнений для вычисления амплитуд зондирующих частот;
- снижение частоты биений допускает использование низкочастотных оптико-электронных и электронных компонент, что значительно снижает стоимость и упрощает самоустройство;
- допускается использование трехчастотного излучения симметричного типа, представляющее собой обычный амплитудно-модулированный сигнал;
- для формирования излучения возможно использование прямой модуляции лазерного источника или абсорбционных модуляторов, обладающих более линейной модуляционной характеристикой и не требующих задания и поддержания рабочей точки;
- при сверхмалом разнесе частот разрешающая способность ограничивается шириной спектральной линии используемого лазерного источника;
- необходимо строгое соблюдение условия пропорционального изменения амплитуд зондирующих частот после прохождения контура.

В общем случае число зондирующих частот может быть произвольным, что, как показано на примере полигармонических излучений [7-8], может дать определенный выигрыш. Определим данный класс РФ ОВА, введя понятие «радиофотонный оптический векторный анализатор на основе N -мерного компрессированного зондирующего излучения», и перейдем к рассмотрению обобщенной математической модели взаимодействия такого излучения с исследуемым оптическим устройством.

Модель РФ ОВА на основе N -мерного компрессированного зондирующего излучения

Опишем вид зондирующего сигнала до и после прохождения контура (рис. 4).

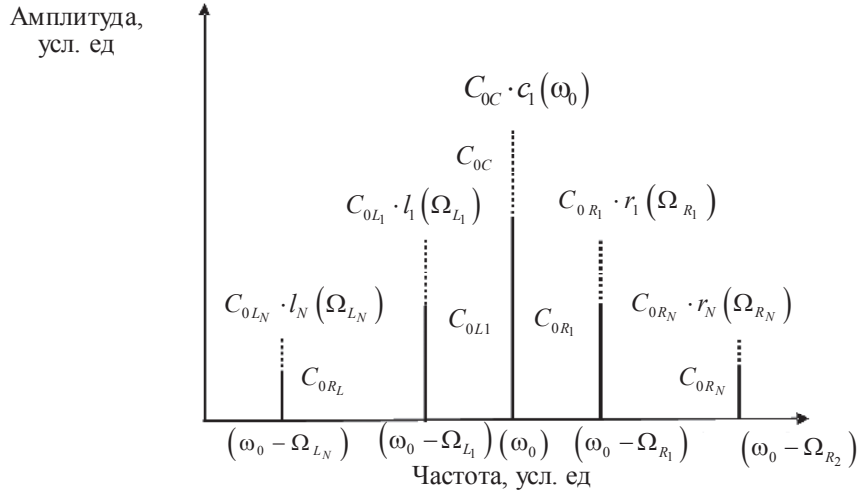


Рис. 4. Зондирующее излучение до (—) и после (---) прохождения через контур

Опишем зондирующие частоты после прохождения контура зависимостью вида:

$$\begin{aligned} A_{L_i}(t) &= C_{0L_i} l_i(\Omega_{L_i}) e^{i((\omega_0 - \Omega_{L_i})t + \phi(\omega_0 - \Omega_{L_i}))}, \\ A_C(t) &= C_{0C} c(\omega_0) e^{i(\omega_0 t + \phi(\omega_0))}, \\ A_{R_i}(t) &= C_{0R_i} r_i(\Omega_{R_i}) e^{i((\omega_0 + \Omega_{R_i})t + \phi(\omega_0 + \Omega_{R_i}))}, \end{aligned} \quad (7)$$

где C_{0C} , C_{0L_i} и C_{0R_i} – амплитуды центральной, левых и правых зондирующих составляющих до прохождения контура; $C_{0C} \cdot c(\omega_0)$, $C_{0L_i} \cdot l_i(\Omega_{L_i})$ и $C_{0R_i} \cdot r_i(\Omega_{R_i})$; Ω_{L_i/R_i} – отстройка левой/правой зондирующей частоты относительно несущей; $\phi(\omega_0 \pm \Omega_{L_i/R_i})$ – фазы зондирующих частот.

Сигнал на выходе фотоприемника опишется как произведение суммы выражений на их комплексное сопряженное:

$$PD(t) = \left[A_C(t) + \sum_i A_{L_i}(t) + \sum_i A_{R_i}(t) \right] \cdot \overline{\left[A_C(t) + \sum_i A_{L_i}(t) + \sum_i A_{R_i}(t) \right]}. \quad (8)$$

Сигнал вида (8) представляет собой сумму колебаний на комбинационных частотах (биения), часть из которых значительно выше полосы пропускания фотоприемника и может быть отброшена. Для выделения колебаний, соответствующих биениям разных гармоник зондирующего излучения, необходимо обеспечение условия:

$$\begin{aligned} \forall (\omega_0 - \Omega_{L_i}) &\neq (\Omega_{L_i} - \Omega_{L_{i-1}}); \\ \forall (\Omega_{R_i} - \omega_0) &\neq (\Omega_{R_{i+1}} - \Omega_{R_i}), \end{aligned} \quad (9)$$

т.е. шаг частот должен быть подобран таким образом, чтобы исключить перекрестные биения внутри левой/правой боковых полос на интересующих частотах биений. После группировки слагаемых по частотам биений из выражения (8) получим:

$$\begin{aligned}
 PD(t) = & \left\{ (C_{0c}c(\omega_0))^2 + \sum_i (C_{0L_i}l_i(\Omega_{L_i}))^2 + \sum_i (C_{0R_i}r_i(\Omega_{R_i}))^2 \right\} + \\
 & + 2 \sum_i C_{0c}c(\omega_0) C_{0L_i}l_i(\Omega_{L_i}) \cos\left((\omega_0 - \Omega_{L_i})t + (\omega_0 - \phi(\omega_0 - \Omega_{L_i})) \right) + \\
 & + 2 \sum_i C_{0c}c(\omega_0) C_{0R_i}r_i(\Omega_{R_i}) \cos\left((\omega_0 + \Omega_{R_i})t + (\phi(\omega_0) - \phi(\omega_0 + \Omega_{R_i})) \right) + \\
 & + 2 \sum_i C_{0L_i}l_i(\Omega_{L_i}) C_{0R_i}r_i(\Omega_{R_i}) \cos\left((\Omega_{R_i} - \Omega_{L_i})t + (\phi(\omega_0) - \phi(\Omega_{R_i} - \Omega_{L_i})) \right). \quad (10)
 \end{aligned}$$

Для осуществления измерений необходимо выделить амплитуды сигнала на частотах биений $(\omega_0 - \Omega_{L_i})$, $(\omega_0 + \Omega_{R_i})$ и $(\Omega_{R_i} - \Omega_{L_i})$ постоянную составляющую:

$$\begin{aligned}
 PD_{DC} = & (C_{0c}c(\omega_0))^2 + \sum_i (C_{0L_i}l_i(\Omega_{L_i}))^2 + \sum_i (C_{0R_i}r_i(\Omega_{R_i}))^2; \\
 PD_{\omega_0 - \Omega_{L_i}}(t) = & 2 \sum_i C_{0c}c(\omega_0) C_{0L_i}l_i(\Omega_{L_i}); \\
 PD_{\omega_0 + \Omega_{R_i}}(t) = & 2 \sum_j C_{0c}c(\omega_0) C_{0R_j}r_j(\Omega_{R_i}); \\
 PD_{\Omega_{R_i} - \Omega_{L_i}}(t) = & 2 \sum_i C_{0L_i}l_i(\Omega_{L_i}) C_{0R_j}r_i(\Omega_{R_i}). \quad (11)
 \end{aligned}$$

Исходя из требований метода, параметры излучения для исследуемого оптического устройства подбираются таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$\begin{aligned}
 \frac{C_{0c}}{C_{0L_i}} = & \alpha_i; \\
 \frac{C_{0c}}{C_{0R_i}} = & \beta_i; \\
 \frac{C_{0c} \cdot c(\omega_0)}{C_{0c}} = & \frac{C_{0L_i} \cdot l_i(\Omega_{L_i})}{C_{0L_i}} = \frac{C_{0R_i} \cdot r_i(\Omega_{R_i})}{C_{0R_i}} = \gamma, \quad (12)
 \end{aligned}$$

где C_{0c} , C_{0L_i} и C_{0R_i} – амплитуды центральной, левых и правых зондирующих составляющих до прохождения контура; $C_{0c} \cdot c(\omega_0)$, $C_{0L_i} \cdot l_i(\Omega_{L_i})$ и $C_{0R_i} \cdot r_i(\Omega_{R_i})$ – то же после прохождения контура; коэффициенты α_i и β_i известны; коэффициент γ – подлежит определению.

С учетом условия (12) выражение (11) можно упростить:

$$\begin{aligned}
 PD_{DC} &= (C_{0C}c(\omega_0))^2 + \sum_i (C_{0L_i}\gamma)^2 + \sum_i (C_{0R_i}\gamma)^2, \\
 PD_{\omega_0-\Omega_{L_i}}(t) &= 2\sum_i C_{0C}c(\omega_0)C_{0L_i}\gamma, \\
 PD_{\omega_0+\Omega_{R_i}}(t) &= 2\sum_j C_{0C}c(\omega_0)C_{0R_j}\gamma, \\
 PD_{\Omega_{R_i}-\Omega_{L_i}}(t) &= 2\sum_i C_{0L_i}\gamma^2C_{0R_j};
 \end{aligned}
 \tag{13.1}$$

$$\begin{aligned}
 PD_{DC} &= (C_{0C}c(\omega_0))^2 + \sum_i (C_{0C}\alpha_i\gamma)^2 + \sum_i (C_{0C}\beta_i\gamma)^2, \\
 PD_{\omega_0-\Omega_{L_i}}(t) &= 2\sum_i C_{0C}c(\omega_0)C_{0C}\alpha_i\gamma, \\
 PD_{\omega_0+\Omega_{R_i}}(t) &= 2\sum_j C_{0C}c(\omega_0)C_{0C}\beta_j\gamma, \\
 PD_{\Omega_{R_i}-\Omega_{L_i}}(t) &= 2\sum_i C_{0C}\alpha_i\gamma^2C_{0C}\beta_i.
 \end{aligned}
 \tag{13.2}$$

Из выражения (13.2) видно, что есть только одно неизвестное – γ и оно может быть вычислено из любого выражения. В том случае, если полученное в ходе вычислений значение γ будет различным для некоторых биений пар зондирующих компонент, это будет свидетельствовать о том, что условие (12) не было выполнено и необходимо скорректировать параметры зондирующего излучения. Далее, используя зависимости (12), вычисляются амплитуды всех зондирующих составляющих.

Заключение

В работе представлены результаты системного анализа методик измерения параметров оптических устройств с использованием ОВА на основе существующих концепций их построения: одночастотной интерферометрической и радиофотонной. Показано, что существующие подходы к построению РФ ОВА (в частности, двухчастотный радиофотонный) имеют ряд ограничений, связанных с невозможностью однозначного определения соответствия зондирующих амплитуд их частотам, а также с погрешностью из-за наличия неподавленных составляющих, возникающих по причине работы ММЦ в нелинейном участке модуляционной характеристики. Первый недостаток для РФ ОВА данного типа трудноустраним, в то время как методы борьбы со вторым существуют, однако значительно усложняют устройство.

В качестве альтернативы была предложена концепция трехчастотного РФ ОВА, которая в данной работе была развита с целью упрощения процедур образования и обработки информационного сигнала, заключающегося в формировании компрессированного (с относительно малым разносом) зондирующего излучения, содержащего N зондирующих частот. Указанный подход имеет ряд описанных преимуществ и, на наш взгляд, крайне перспективен.

В работе предложена обобщенная модель взаимодействия такого излучения с контуром.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-03-2020-051/6 (номер темы fzs-2020-0020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Heffner, B.L.* Deterministic, analytically complete measurement of polarization-dependent transmission through optical devices // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1992. – Vol. 4:5.
2. *Dawn, K. Gifford, Brian, J. Soller, Matthew, S. Wolfe and Mark E. Froggatt* Optical vector network analyzer for single-scan measurements of loss, group delay, and polarization mode dispersion// *APPLIED OPTICS*. – 2005. – Vol. 44. – No. 34. – Pp. 7282-7286.
3. *Dai, J. Chen, Z., Wang, X. et al.* Accurate optical vector network analyzer based on optical double-sideband suppressed carrier modulation // *Optics Communications*. – 2019. – Vol. 447. – Pp. 61-66.
4. *Василец, А.А., Морозов, О.Г., Нуреев, И.И. и др.* Симметричный векторный анализатор для характеристики спектральных параметров оптических высокочастотных структур // *Фотон-экспресс*. – 2020. – № 7 (167). – С. 15-21.
5. *Нуреев, И.И.* Векторный анализатор сетей на основе амплитудно-фазового преобразования оптической несущей // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2015. – № 3. – С. 183-186.
6. *Sakhabutdinov, A.Zh., Morozov O.G., Nureev I.I. et al.* Ultrahigh-Resolution Optical Vector Analyzers // *Photonics*. – 2020. – Vol. 7. – No.14.
7. *Нуреев, И.И.* Статическая и динамическая радиофотонная интеррогация однотипных волоконных брэгговских решеток при полигармоническом зондировании // *Научно-технический электронный журнал «Вестник Поволжья»*. – 2016. – № 3. – С. 69-71.
8. *Нуреев, И.И.* Радиофотонные амплитудно-фазовые методы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // *Инженерный вестник Дона*. – 2016. – № 2 // Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581.

CONCEPT OF A NEW TYPE OF MICROWAVE PHOTONIC OPTICAL VECTOR ANALYZERS

A.A. Kuznetsov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx Str., Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. The paper presents an overview of the existing techniques for constructing interferometric and microwave photonic optical vector analyzers (OVA); the factors limiting their metrological characteristics are revealed. On the basis of the existing groundwork of the scientific team, a new concept of microwave photonic OVA (MW OVA) based on tunable multifrequency (with ultra-small spacing) probe radiation called «N-dimensional compressed probe radiation» was proposed. In this paper, a concept for constructing such MW OVA will be proposed, and a generalized mathematical model of the interaction of such radiation with a resonant circuit will be described.

Keywords: optical vector analyzer, radio photonics, three-frequency radiation.

Статья поступила в редакцию 17.05.2021