

ИНФОРМАЦИОННАЯ СТРУКТУРА СВЕРХУЗКОПОЛОСНОГО ПАКЕТА ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТОТ КАК ЗОНДИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НОВОГО ТИПА ДЛЯ РАДИОФОТОННЫХ ВЕКТОРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ

*А.А. Кузнецов, А. Лиц, Е.В. Мочалова,
С.Р. Галиев, И.И. Шайгарданов*

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

Аннотация. В работе дано определение нового типа зондирующего излучения для радиофотонного векторного анализатора – сверхузкополосный пакет дискретных частот. На примере трехчастотного пакета продемонстрированы основные свойства этого излучения.

Ключевые слова: радиофотонный векторный анализатор, радиофотоника, модуляция оптического излучения, сверхузкополосный пакет дискретных частот.

1. Сверхузкополосный пакет дискретных частот: определение

Современные тренды развития измерительного оборудования для контроля характеристик волоконно-оптических компонентов связаны с использованием принципов радиофотоники для повышения их метрологических и технико-экономических характеристик. В работах [1–5] приведены примеры радиофотонных векторных анализаторов (РФВА), использующие различные виды зондирующих излучений, определены их преимущества и недостатки. Стоит отметить, что ни один из существующих типов РФВА не раскрывает в полной мере потенциал радиофотонных методов обработки информации [6–9], поэтому в рамках данной работы перед авторами стоит задача предложить и новый тип излучения и обосновать достижимое улучшение характеристик, рассмотрев его информационную структуру.

Сверхузкополосный пакет дискретных частот (СПДЧ) – излучение, содержащее две и более частотные компоненты с фиксированными разностными частотами, максимальная из которых подобрана таким образом, что при прохождении такого излучения через исследуемое устройство (ИУ), изменение амплитуд всех гармоник происходит пропорционально одной и той же величине, а минимальная – превышает спектральную ширину лазера, при этом начальные фазы каждой из компонент строго детерминированы, а их разность известна.

Сформулированные выше требования к СПДЧ [10-12] позволяют: исследовать спектральные характеристики произвольных ИУ как с симметричным, так и асимметричным профилем; исключить необходимость обработки постоянной составляющей сигнала; анализировать сигнал на выходе фотоприемника на фиксированных и заранее известных разностных частотах; исключить необходимость предварительного сканирования контура ИУ с целью размещения зондирующего излучения симметрично относительно его резонансной частоты; избежать ограничений на минимальный шаг перестройки; исключить необходимость дополнительного анализа фазы сигнала на выходе фотоприемника, возникающей при зондировании контуров с асимметричным профилем; обеспечить возможность сканирования как полосовых широкополосных, так сверхузкополосных структур с заранее заданной разрешающей способностью; упростить

способ формирования сканирующего излучения; сформировать универсальный подход к вычислению амплитуд, вне зависимости от количества гармоник зондирующего излучения.

В общем случае число компонент, их начальные амплитуды, фазы и шаг частот могут быть произвольными (но известными). Для простоты восприятия рассмотрим частный случай симметричного трехчастотного СПДЧ.

2. Информационная структура симметричного трехчастотного СПДЧ

Для описания математической модели СПДЧ и определения его информационной структуры *введем ряд допущений* на основе обобщенной структурной схемы анализатора (рис. 1).

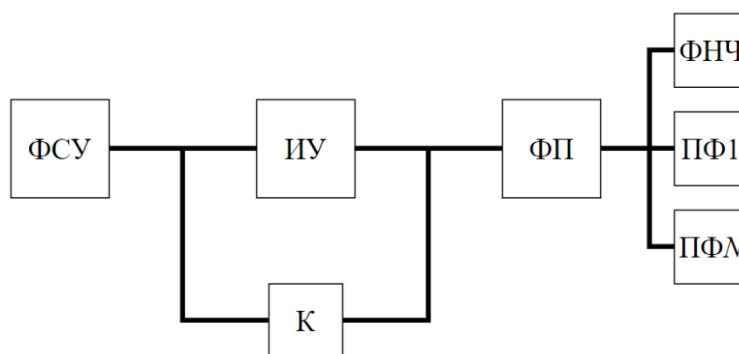


Рис. 1. Устройство зондирования ИУ:

ФСУ – формирователь сканирующего излучения, ИУ – исследуемое устройство, К – ключ, ФП – фотоприемник, ФНЧ – фильтр нижних частот, ПФ – полосовой фильтр

Предположим, что флуктуации амплитуд, частот и фаз гармоник излучения отсутствуют. Каждая компонента сверхузкополосного пакета дискретных частот описывается монохроматическим излучением (1), спектр которого сводится к дельта-функции Дирака.

$$S(t) = Se^{j(\omega t + \phi)} \quad (1)$$

где S , ω и ϕ – амплитуда, частота и начальная фаза компоненты излучения, j – мнимая единица. В реальности излучение вида (1) получить невозможно, любое лазерное излучение имеет конечную (не нулевую) спектральную ширину линии излучения.

Исследуемое устройство. Предположим, что ИУ изменяет только амплитудные и фазовые характеристики излучения. Влиянием поляризации, поляризационно-модовой дисперсией (ПМД) и другими искажениями в ИУ, в том числе нелинейными, пренебрегаем. Несмотря на кажущуюся жесткость выдвинутых ограничений, они могут быть применены к исследованиям широкого класса ИУ, таких как: волоконные брэгговские решетки (ВБР), адресные волоконные брэгговские структуры (АВБС), мультиплексоры WDM, chirпированные ВБР, разветвители, аттенюаторы и другие пассивные устройства ВОЛП.

Фотоприемник (ФП). В качестве фотоприемника используются фотодиоды. Фотодиод – нелинейный элемент, ток которого пропорционален квадрату модуля принимаемого оптического излучения:

$$P(t) = |S(t)|^2 = S(t) \times \overline{S(t)}, \quad (2)$$

где $S(t)$ – принимаемое оптическое излучение, $P(t)$ – ток фотоприемника, а верхней горизонтальной чертой обозначена операция комплексного сопряжения.

Набор фильтров (ФНЧ, ПФ1...ПФN). АЧХ фильтров считаем идеальной, ширина

полосы пропускания ПФ в точности совпадает со спектральной шириной линии излучения. Коэффициенты передачи ФНЧ и ПФ считаем равными единице. Это ограничение математической модели можно считать достаточно жестким, но оно является прямым следствием сделанных допущений на спектральную ширину линии излучения, и несмотря на это, позволяет построить адекватную математическую модель.

Пассивные элементы оптического и электронного трактов измерительной системы линейны, затухания отсутствуют, спектральные характеристики пропускания и РЧ передаточные характеристики всех элементов равномерны во всей полосе используемых частот.

В качестве примера рассмотрим симметричный СПДЧ, содержащий три компоненты, и продемонстрируем, как с его помощью достигаются описанные требования. Порядок взаимодействия такого излучения с контуром ИУ в точке сканирования приведен на рис. 2.

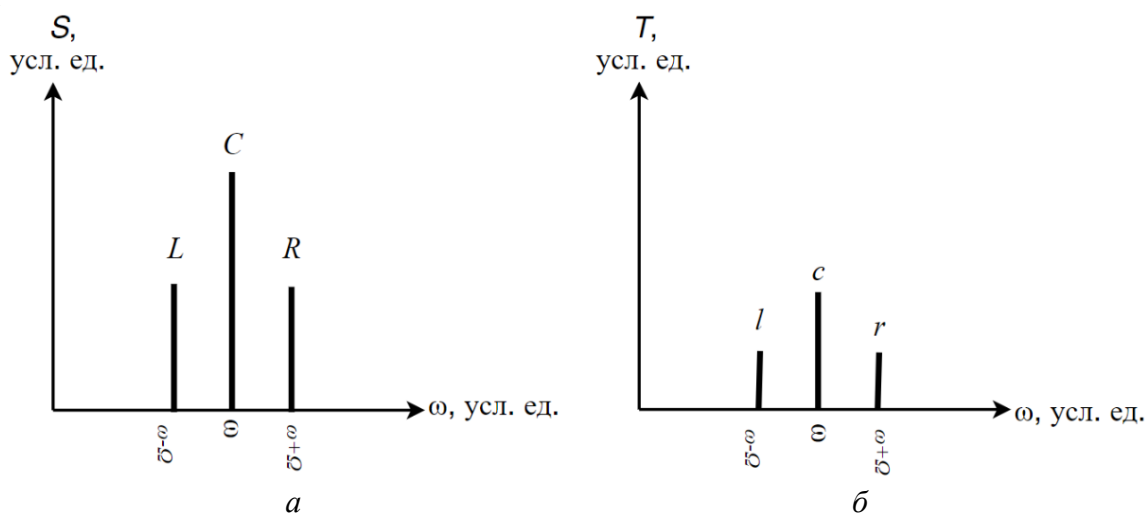


Рис. 2. Взаимодействие трехчастотного СПДЧ с ИУ в точке сканирования: *а* – СПДЧ до взаимодействия с контуром, *б* – после взаимодействия с контуром

Ток фотоприемника в этом случае представляет собой огибающую биений гармоник зондирующего излучения:

$$\begin{aligned}
 P(t, \omega) = & l^2(\omega) + c^2(\omega) + r^2(\omega) + \\
 & + 2[c(\omega)l(\omega) + r(\omega)c(\omega)]\cos(\Omega t) + \\
 & + 2l(\omega)r(\omega)\cos(2\Omega t)
 \end{aligned} \quad (3)$$

где $l(\omega)$, $c(\omega)$ и $r(\omega)$ – амплитуды (левой, центральной и правой частот) трехчастотного СПДЧ, прошедшего через ИУ, Ω – разностная частота СПДЧ.

Выделив с помощью ФНЧ постоянную составляющую, а с помощью ПФ – биения на частотах Ω и 2Ω , получим систему из трех уравнений относительно трех неизвестных $l(\omega)$, $c(\omega)$ и $r(\omega)$:

$$\begin{cases} D_0 = l^2(\omega) + c^2(\omega) + r^2(\omega) \\ D_\Omega = 2 \cdot [c(\omega)l(\omega) + r(\omega)c(\omega)] \\ D_{2\Omega} = 2 \cdot l(\omega) \cdot r(\omega) \end{cases} \quad (4)$$

Критерий пропорционального изменения амплитуд гармоник сканирующего излучения:

$$\frac{c(\omega)}{C} = \frac{l(\omega)}{L} = \frac{r(\omega)}{R} = \gamma(\omega), \quad (5)$$

где $\gamma(\omega)$ – коэффициент изменения амплитуд, одинаковый для всех гармоник СПДЧ. Подстановка (5) в (4) упрощает систему уравнений:

$$\begin{cases} D_0 = \gamma^2(\omega) [L^2(\omega) + C^2(\omega) + R^2(\omega)] + o(\Omega) + N_0 \\ D_\Omega = 2\gamma^2(\omega) \cdot [C(\omega)L(\omega) + R(\omega)C(\omega)] + o(\Omega) + N_\Omega \\ D_{2\Omega} = 2\gamma^2(\omega) \cdot L(\omega) \cdot R(\omega) + o(\Omega) + N_\Omega \end{cases}, \quad (6)$$

где $o(\Omega)$ – вклад в информационный сигнал перекрестных биений боковых частот высокого порядка левой и правой боковых полос на частоте Ω , N_0 – шум фотоприемника на нулевой частоте, N_Ω – в полосе частот фильтра.

Исключение из рассмотрения постоянного сигнала D_0 (имеющего худшее отношение сигнал/шум), дает два равноправных уравнения для вычисления одной и той же неизвестной величины – коэффициента пропорциональности изменения амплитуд $\gamma(\omega)$, что позволяет, как минимум, сформулировать критерий попадания сканирующего излучения в контур ИУ:

$$|\gamma_\Omega - \gamma_{2\Omega}| \leq \varepsilon \quad (7)$$

где γ_Ω и $\gamma_{2\Omega}$ значения параметра γ , вычисленные из сигналов D_Ω и $D_{2\Omega}$, ε – величина, определяющая погрешность измерения.

Таким образом, информационная структура двухчастотного СПДЧ должна удовлетворить всем сформулированным требованиям и позволить восстановить характеристики ИУ с произвольной формой контура. Трехчастотный СПДЧ, обладая богатой информационной структурой, позволяет дополнительно сформулировать критерий попадания зондирующего излучения в контур ИУ.

Заключение

В работе описана информационная структура сканирующего излучения для построения радиофотонных векторных анализаторов нового типа, названного сверхузкополосный пакет дискретных частот, определяемого как излучение, содержащее две и более частотные компоненты с фиксированными разностными частотами, максимальная из которых подобрана таким образом, что при прохождении такого излучения через исследуемое устройство, изменение амплитуд всех гармоник происходит пропорционально одной и той же величине, а минимальная – превышает спектральную ширину лазера, при этом начальные фазы каждой из компонент строго детерминированы, а их разность известна. Представлены основные аналитические соотношения для восстановления амплитудно-частотной характеристики в частном случае симметричного трехчастотного сверхузкополосного пакета дискретных частот.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания КНИТУ-КАИ № 075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020, программа «Фократ»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Román, J.E. Spectral characterization of fiber gratings with high resolution / J.E. Román, M.Y. Frankel, R.D. Esman // Optics Letters. – 1998. – V. 23, № 12. – P. 939-941.
2. Hernández, R. Optical vector network analysis based on single-sideband modulation/ R. Hernández, A. Loayssa, D. Benito // Optical Engineering. – 2004. – V. 43, № 10. – P. 2418-2421.

3. *Loayssa, A.* Characterization of stimulated Brillouin scattering spectra by use of optical single-sideband modulation / A. Loayssa // *Optics Letters*. – 2004. – V. 29, № 6. – P. 638-640.
4. *Gifford, D.K.* Optical vector network analyzer for single-scan measurements of loss, group delay, and polarization mode dispersion / D.K. Gifford // *Applied Optics*. – 2005. – V. 44, № 34. – P. 7282-7286.
5. *Xue, M.* Influence of Unwanted First-Order Sideband on Optical Vector Analysis Based on Optical Single-Sideband Modulation / M. Xue, S. Pan // *Journal of Lightwave Technology*. – 2017. – V. 35, № 13. – P. 2580-2586.
6. *Папазян, С.Г.* Методы формирования асимметричного трёхчастотного излучения со смещённой несущей в задаче оптического векторного анализа / С.Г. Папазян // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых) Материалы Международной молодёжной научной конференции. – 2019. – С. 515-520.
7. *Morozov, O.* Ultrahigh-Resolution Optical Vector Analyzers / O. Morozov // *Photonics*. 2020. – V. 7, № 1. – P. 14.
8. *Morozov, O.G.* Optical vector analyzer based on carrier-suppressed double-sideband modulation and phase-shift fiber Bragg grating / O.G. Morozov // *Optical Technologies for Telecommunications 2018 Proc SPIE*. – International Society for Optics and Photonics. 2019. V. 11146. P. 111460R.
9. *Morozov, O.* Optical vector analyzer for characterization of Fano resonance structures based on unbalanced double-sideband modulation / O. Morozov // *ITM Web of Conferences*. – 2019. – V. 30. – P. 14003.
10. *Кузнецов, А.А.* Концепция построения радиофотонных оптических векторных анализаторов нового типа / А.А. Кузнецов // *Электроника, фотоника и киберфизические системы*. – 2021. – Т. 1, № 1. – С. 47-55.
11. *Кузнецов, А.А.* Концепция построения радиофотонных векторных анализаторов на основе сверхузкополосного пакета дискретных частот / А.А. Кузнецов // *Инженерный вестник Дона*. – 2021. – №9. – Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7205, свободный (дата обращения 24.10.2021).
12. *Кузнецов, А.А.* Сравнительная оценка способов формирования излучений в виде сверхузкополосного пакета дискретных частот / А.А. Кузнецов // *Инженерный вестник Дона*. – 2021. – №9. – Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7199, свободный (дата обращения 24.10.2021).

INFORMATION STRUCTURE OF THE ULTRA NARROWBAND PACKAGE OF DISCRETE FREQUENCIES AS A NEW TYPE OF PROBE RADIATION FOR MICROWAVE PHOTONIC VECTOR ANALYZERS

*Artem A. Kuznetsov, Artur Lits, Ekaterina V. Mochalova,
Sirin R. Galiev, Ilshat I. Shaigardanov*

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

Abstract. The paper gives a definition of a new type of probing radiation for a microwave photonic vector analyzers – an ultra-narrowband packet of discrete frequencies. The basic properties of this radiation are demonstrated by the example of a three-frequency packet.

Keywords: microwave photonic vector analyzer, microwave photonics, modulation of optical radiation, ultra-narrowband packet of discrete frequencies.

Дата поступления статьи в редакцию 25.11.2021