

# Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 621.383  
DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.106-113

Дата поступления: 08.10.2019  
Дата принятия: 06.11.2019

## Математическая модель сканирования произвольного резонансного контура непрерывным трехчастотным лазерным излучением

О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев, В.В. Садчиков

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

В работе предложена математическая модель сканирования произвольной оптоволоконной резонансной структуры со сверх узкой спектральной формой непрерывным трехчастотным асимметричным сигналом. Показывается, что метод трехчастотного асимметричного сканирования имеет существенные преимущества перед методами симметричного полигармонического сканирования. Кроме того, предложенная методика позволяет исследовать спектральные характеристики сверхузких резонансных контуров, поскольку методика предполагает измерения биений на разностных частотах исходного трехчастотного излучения, которые могут быть порядка единиц-десятков мегагерц.

**Ключевые слова:** оптоволоконный резонансный контур; трехчастотное зондирующее излучение, асимметричные амплитуды составляющих зондирующего излучения, сканирование, анализ биений на разностных частотах зондирующего излучения.

### Введение

В сенсорных системах для опроса, получения и преобразования информации с волоконных брэгговских решеток (ВБР) используется широкополосная или перестраиваемая в широком диапазоне оптико-электронная измерительная аппаратура – интеррогаторы. Оптико-электронная аппаратура интеррогаторов характеризуются рядом ограничений, что достаточно подробно показано в [1–4].

В последнее время в волоконно-оптических датчиках начинают активно применяться структурированные ВБР различного типа с включенными в них неоднородностями (например, в виде дискретных фазовых  $\pi$ -сдвигов) [2; 4; 5] или датчики с сверх узкополосными откликами, основанные на других физических эффектах (например, резонанс Фано) [2; 6]. Методы опроса оптических анализаторов спектра не всегда позволяют достичь желаемого результата, поскольку спектральная ширина окон прозрачности таких резонансных структур много меньше разрешающей способности большинства современных оптических анализаторов спектра.

В [1] впервые представлены радиофотонные методы и средства решения, указанных выше проблем, которые основаны на построении полигармонических систем зондирования волокон-

но-оптических датчиков в радиофотонных системах опроса двух-, четырех-, и многочастотным симметричным излучением с четным числом составляющих. В [2–4] предложена модель опроса адресных волоконных брэгговских структур, которая предполагает использование резонансных контуров с двухчастотным спектром отражения и очень узкими частотными откликами каждой частотной несущей, формирующей адрес. При использовании таких резонансных структур неизбежно встает вопрос исследования спектральной характеристики их структур и контроля качества их производства [3; 4].

В литературе не найдено результатов исследований прямого прохождения асимметричного или фазомодулированного трехчастотного сигнала через резонансный контур, что послужило основанием для проведения научно-исследовательской работы по изучению этого явления.

### 1. Математическая модель

Математическая модель произвольного трехчастотного излучения и его пересечения с произвольным резонансным контуром строится в предположении, что трехчастотное излучение представляет собой три непрерывных сверхузких лазерных излучения спектральной шириной ли-

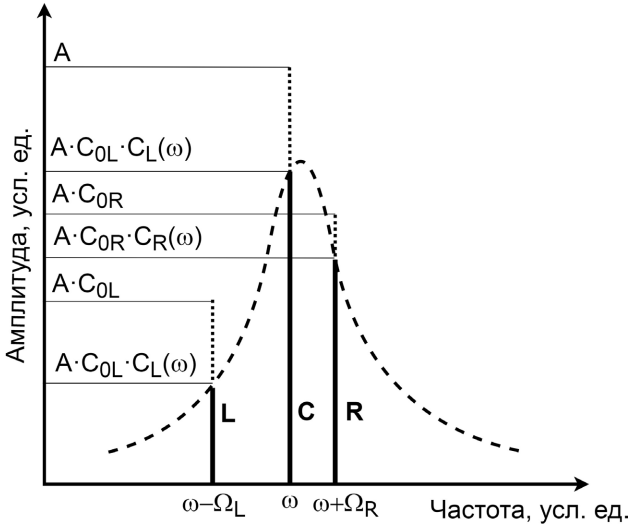


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика резонансного контура, при взаимодействии с трехчастотным сканирующим излучением

нии, которых по отношению к спектральной ширине сканируемого интервала и к добротности исследуемого резонансного контура можно пренебречь, описав каждую компоненту исходного лазерного излучения дельта-функцией [7], [8]. На рис. 1 приведена схема трехчастотного лазерного излучения при взаимодействии с произвольным резонансным контуром [11].

В выдвинутых условиях математической модели, каждую составляющую трехчастотного излучения можно описать в виде гармонических колебаний на соответствующих частотах оптического излучения:

$$\begin{aligned} A_L(t) &= AC_{0L}C_L(\omega)\sin((\omega - \Omega_L)t + \varphi_L(\omega)), \\ A_C(t) &= AC_{0C}C_C(\omega)\sin(\omega t + \varphi_C(\omega)), \\ A_R(t) &= AC_{0R}C_R(\omega)\sin((\omega + \Omega_R)t + \varphi_R(\omega)). \end{aligned} \quad (1)$$

В (1) использованы обозначения  $A$  – исходная максимальная амплитуда сигнала; индексы  $L$ ,  $C$  и  $R$  обозначают гармонику исходного излучения – левой, центральной и правой составляющей излучения, соответственно. Коэффициенты  $C_{0L}$ ,  $C_{0C}$ ,  $C_{0R}$  определяют известное взаимное отношение исходного лазерного излучения и являются константами. Коэффициенты  $C_L(\omega)$ ,  $C_C(\omega)$  и  $C_R(\omega)$  определяют коэффициенты взаимного отношения величин амплитуд трехчастотного лазерного излучения после прохождения его через резонансный контур и являются функциями частоты. Величины  $\omega - \Omega_L$ ,  $\omega$ ,  $\omega + \Omega_R$  – мгновенные частоты трехчастотного лазерного излучения левой, центральной и правой составляющих, соответственно, рис. 1. Функции  $\varphi_L(\omega)$ ,  $\varphi_C(\omega)$  и  $\varphi_R(\omega)$  описывают изменение фазы трехчастотного сканирующего излу-

чения после прохождения его через резонансный контур.

Результирующий световой поток принимается на фотоприемнике, который является нелинейным низкочастотным квадратичным элементом, нечувствительным к высокочастотным колебаниям, а сам результирующий выходной ток фотоприемника пропорционален квадрату светового потока на него поступающего. Колебание интенсивности мощности выходного тока фотоприемника представляет собой суперпозицию постоянного уровня мощности – первое слагаемое в (2), и суммы трехчастотных колебаний на разностных частотах трехчастотного лазерного излучения  $\Omega_L$ ,  $\Omega_R$  и  $\Omega_L + \Omega_R$ .

$$\begin{aligned} P(t) &= A_L^2(\omega) + A_C^2(\omega) + A_R^2(\omega) + \\ &+ 2A_L(\omega)A_C(\omega)\cos(\Omega_L t + (\varphi_C - \varphi_L)) + \\ &+ 2A_C(\omega)A_R(\omega)\cos(\Omega_R t + (\varphi_R - \varphi_C)) + \\ &+ 2A_L(\omega)A_R(\omega)\cos((\Omega_L + \Omega_R)t + (\varphi_R - \varphi_L)). \end{aligned} \quad (2)$$

Постоянный уровень сигнала и амплитуды колебаний на частотах  $\Omega_L$ ,  $\Omega_R$  и  $\Omega_C = \Omega_L + \Omega_R$  являются источником данных для определения амплитуд  $A_L$ ,  $A_C$ ,  $A_R$  информация о которых позволяет полностью восстановить амплитудно-частотную характеристику контура. Эти четыре соотношения можно рассматривать как систему из четырех уравнений для определения трех неизвестных, следовательно, система переопределена, поскольку количество уравнений превосходит количество неизвестных. Разделив амплитуды колебаний на разностных частотах на постоянный уровень сигнала, получим систему из трех уравнений для нахождения трех неизвестных амплитуд:

$$\begin{cases} D_L(\omega) = 2A_L(\omega)A_C(\omega), \\ D_R(\omega) = 2A_R(\omega)A_C(\omega), \\ D_C(\omega) = 2A_L(\omega)A_R(\omega). \end{cases} \quad (3)$$

Можно показать, что постоянный уровень сигнала в (2) почти везде равен константе. Термин «почти везде», здесь использован в том понимании, что (3) равно константе, если трехчастотное сканирующее излучение попало в частотный диапазон светового отклика резонансного контура. И имеет неопределенное значение, если трехчастотное излучение выходит из этого диапазона. Это позволяет нам сформулировать критерий попадания трехчастотного сканирующего излучения в частотный диапазон светового отклика резонансного контура:

$$\frac{D_0(\omega)}{D_C(\omega)} = \frac{1}{2} \left( \frac{A_L(\omega)}{A_R(\omega)} + \frac{A_C(\omega)}{A_L(\omega)A_R(\omega)} + \frac{A_R(\omega)}{A_L(\omega)} \right) \cong \text{const.} \quad (4)$$

Преобразуем систему уравнений (3), выделив из нее амплитуду центральной частоты трехчастотного сканирующего излучения. Для чего помножим первое и второе уравнения (3) друг на друга, а результат разделим на третье уравнение, откуда легко выразить амплитуду центральной гармоники трехчастотного лазерного излучения на частоте сканирования:

$$A_C(\omega) = \pm \sqrt{\frac{D_L(\omega)D_R(\omega)}{2D_C(\omega)}}. \quad (5)$$

Отрицательное значение амплитуды не имеет физического смысла, следовательно, из (5) его исключаем. Кроме того, может случиться так, что трехчастотное сканирующее излучение будет попадать в зону отсутствия контура, тогда и результирующие амплитуды отклика, в частности левой и правой гармоники, будут равны или близки к нулю. Что может привести в (5) к ошибке деления на ноль. Из того что амплитуда колебаний на разностной частоте  $\Omega_L + \Omega_R$  равна нулю, следует что амплитуда левой или правой сканирующей составляющей равна нулю. Что в свою очередь свидетельствует о попадании этой гармоники в зону отсутствия резонансного контура.

Введение дополнительного условия позволит определить амплитуду резонансного контура на сканируемой частоте. Это условие будет заключаться в том, чтобы разностная частота между левой и правой гармониками  $\Omega_L + \Omega_R$  была меньше требуемой точности сканирования. Выдвинутое требование позволяет сделать вывод о том, что если одна из амплитуд сканирующего сигнала равна нулю, то и близкие к ней амплитуды остальных компонент тоже будут экстремально близки к нулю.

В условиях выдвинутого требования, выражение для результирующей амплитуды резонансного контура на частоте  $\omega$ , можно переписать в виде:

$$A_C(\omega) = \begin{cases} \sqrt{\frac{D_L(\omega)D_R(\omega)}{2D_C(\omega)}}, & |D_C(\omega)| > \varepsilon_0, \\ 0, & |D_C(\omega)| \leq \varepsilon_0, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\varepsilon_0$  – заранее заданная минимально допустимая величина уровня сигнала.

Выражение (6) позволяет провести оценку погрешности восстановления формы сканируемого

резонансного контура в каждой точке. Для этого представим величину вычисленной амплитуды с погрешностью в виде (7), внося в (6) параметр, определяющий погрешность определения амплитуды биений на частотах  $\Omega_L$ ,  $\Omega_R$  и  $\Omega_L + \Omega_R$ , исключив из рассмотрения нулевое значение амплитуды и введя погрешность  $\varepsilon$  определения амплитуд биений:

$$A\varepsilon_C(\omega) = \sqrt{\frac{(D_L(\omega) + \varepsilon)(D_R(\omega) + \varepsilon)}{2(D_C(\omega) + \varepsilon)}}. \quad (7)$$

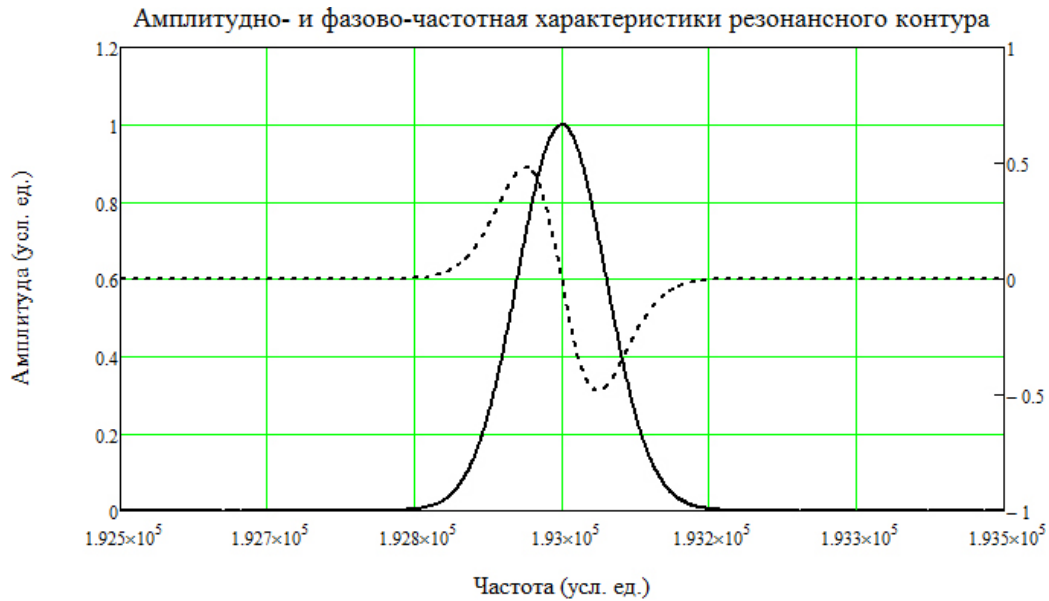
Найдем относительную погрешность определения амплитуды резонансного контура в точке  $\omega$ , если погрешность определения амплитуд колебаний на разностных частотах не превышает  $\varepsilon$ :

$$Err = \left| 1 - \frac{1 + \varepsilon \frac{D_L + D_R}{D_L D_R} + \frac{\varepsilon^2}{D_L D_R}}{1 + \frac{\varepsilon}{D_C}} \right|. \quad (8)$$

Третье слагаемое числителя выражения (8) стоящего под радикалом имеет второй порядок малости по отношению к остальным слагаемым. Следовательно, выражение (8) можно упростить, опустив слагаемые второго порядка малости. Вместе с тем, мы не будем прибегать к такой необходимости, поскольку это не сказывается на увеличении сложности вычислений.

Оценим величину погрешности. Амплитуды колебаний на разностных частотах определяются модулем аналого-цифрового преобразования, типовая погрешность определения значений которого составляет около 1/1000 от полной шкалы измерений. Следовательно, можно определить порядок величин амплитуд  $D_x \sim 1000$  усл. ед., а  $\varepsilon$  (максимально)  $\sim 1$  усл. ед. полной шкалы измерений модуля аналого-цифрового преобразования. Подставив эти значения в (8), получим относительную погрешность определения амплитуды резонансного контура на сканируемой частоте  $Err \sim 10^{-4}$ . Из чего можно сделать вывод, что максимальная относительная погрешность восстановления амплитуды резонансного контура в каждой точке сканирования не превышает минус 40 дБ.

Для получения точности определения амплитуд в точке сканирования от точности определения амплитуды электрического сигнала на фотоприемнике, можно заменить  $D_L$ ,  $D_C$  и  $D_R$  на максимальную погрешность  $D_{\max}$ . Что позволит получить окончательное выражение для оценки



**Рис. 2.** Характеристика исследуемого резонансного контура: амплитудно-частотная характеристика – сплошная линия; фазово-частотная характеристика – пунктирная линия

максимальной погрешности определения величины амплитуды в зависимости от точности определения амплитуды колебаний на разностных частотах:

$$Err(\varepsilon) = \left| 1 - \sqrt{\frac{1 + 2\varepsilon + \varepsilon^2}{1 + \varepsilon}} \right|. \quad (9)$$

Простейший способ восстановления фазово-частотной характеристики исследуемого резонансного контура при одночастотном сканировании резонансного контура заключается в анализе интерференции направленного на контур и прошедшего через него излучений [9; 10]. В случае трехчастотного сканирования можно поступить аналогичным образом.

При сканировании резонансного контура трехчастотным асимметричным (как по разнесу частот, так и по амплитуде) излучением восстановление фазово-частотной характеристики исследуемого резонансного контура производится аналогичным образом, как и при одночастотном сканировании. Исходное трехчастотное излучение описывается выражением (2), а прошедшее выражением (10):

$$S(t, \omega) = A'_L(\omega) \sin((\omega - \Omega_L)t + \varphi_0 + \psi(\omega)) + A'_C(\omega) \sin(\omega t + \varphi_0 + \psi(\omega)) + A'_R(\omega) \sin((\omega + \Omega_R)t + \varphi_0 + \psi(\omega)). \quad (10)$$

Выходной ток фотоприемника будет пропорционален квадрату суммы (2) и (10), выполнив эти преобразования, предварительно упростив сумму сканирующего и прошедшего излучений и проведя математические преобразования, получим формулу, позволяющую напрямую вычислить величину фазовой задержки в точке сканирования:

$$\psi(\omega) = \arcsin \left( \frac{1}{2} \frac{D(t, \omega) \Big|_{\Omega_L + \Omega_R}}{A'_L(\omega)A'_R(\omega) - A'_L(\omega)A'_R(\omega)} \right). \quad (11)$$

## 2. Результат моделирования

Рассмотрим сканирование произвольного резонансного контура с нормальным распределением в амплитудно-частотной плоскости трехчастотным излучением с равномерным распределением частот и асимметрией амплитуд в исходном сигнале. Амплитудно-частотная характеристика исследуемого резонансного контура и его фазово-частотной характеристики приведена на рис. 2.

Ситуационный вид низкочастотного сигнала колебаний мощности электрического сигнала на фотоприемнике, как огибающей кривой высокочастотного оптического сигнала, приведен на рис. 3. Кривая приведена в случае попадания трехчастотного сигнала в центр исследуемого резонансного контура.

На рис. 4 приведены точные значения зависимости амплитуд высокочастотных сканирующих составляющих и амплитуд на разностных частотах в зависимости от положения центральной частоты сканирующего сигнала. Как видно из рис. 4, амплитуда центральной частоты сканирования полностью повторяет форму исследуемого резонансного контура. Кривые для амплитуд на разностных частотах имеют асимметрию относительно центральной частоты сканируемого контура. Это связано с тем, что между левой и центральной и центральной и правой частотными составляющими разный разнос частот.

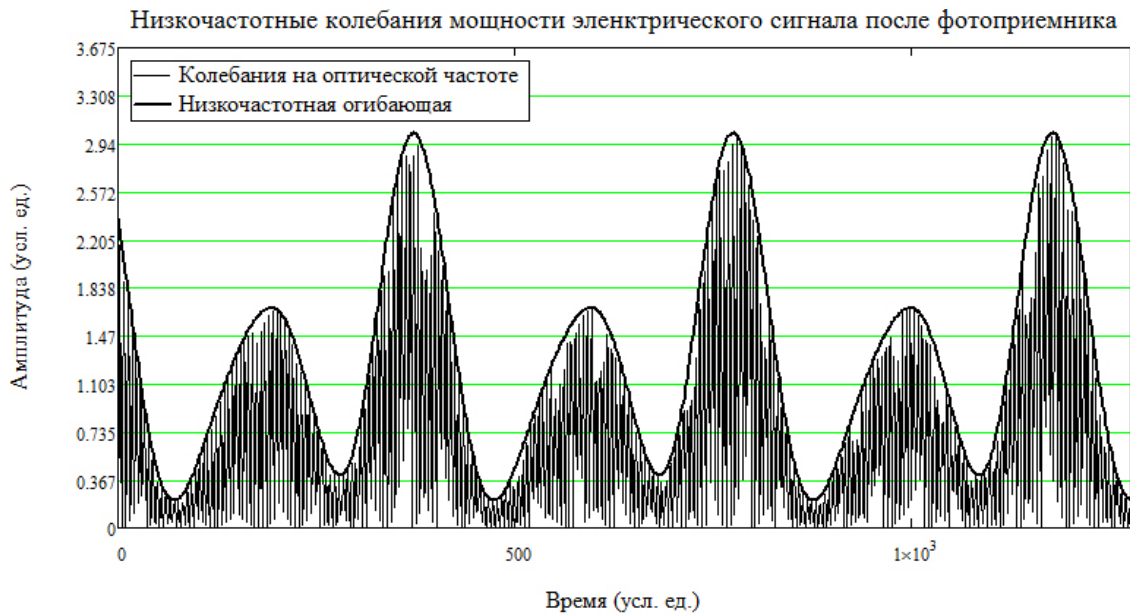


Рис. 3. Низкочастотная огибающая (толстая линия), принимаемая на фотоприемнике, и ее высокочастотное заполнение (тонкая линия)

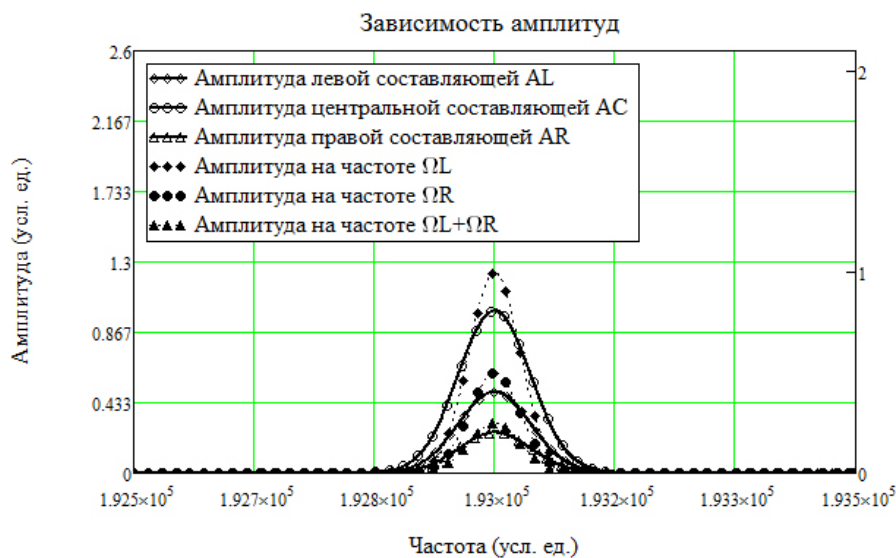


Рис. 4. Кривые зависимости амплитуд высокочастотных сканирующих составляющих и амплитуд на разностных частотах в зависимости от положения центральной частоты сканирующего сигнала

На рис. 5 приведены восстановленные формы резонансного контура методом трехчастотного сканирования: кривой с заполненными маркерами приведено аналитическое решение; с пустыми маркерами – решение, найденное численно; тонкая линия относительная погрешность определения формы контура.

Относительная погрешность восстановления амплитудно-частотной формы резонансного контура в каждой точке не превышает  $5 \times 10^{-3}$ . Что является весьма хорошим показателем точности для погрешности определения амплитуды низкочастотного сигнала в 1 % от шкалы и заданной погрешности формы самого контура в 0,1 %. Причем,

в области значений самого резонансного контура, эта погрешность на порядок меньше чем в области отсутствия светового отклика.

Критерий попадания трехчастотного излучения в диапазон светового отклика исследуемого резонансного контура, приведен на рис. 6. Как хорошо можно видеть, в пределах исследуемого резонансного контура критерий удовлетворяет условиям постоянства своего значения, а за пределами контура наблюдаются непредсказуемые осцилляции, по которым можно и делать вывод о выходе сканирующего излучения их частотного диапазона светового отклика исследуемого резонансного контура.



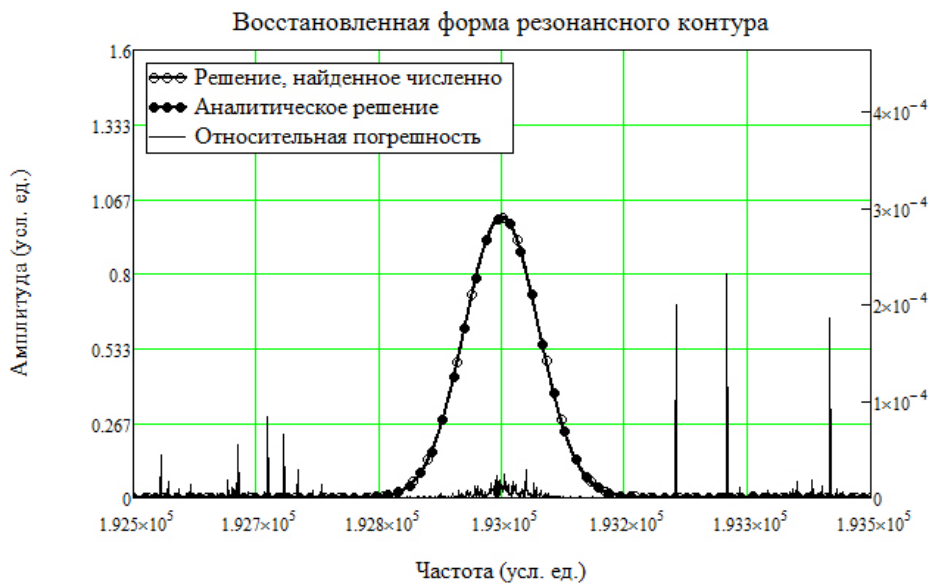


Рис. 5. Восстановленная форма резонансного контура методом трехчастотного сканирования с неравным распределением частот и асимметричными амплитудами: кривой с заполненными маркерами приведено аналитическое решение; с пустыми маркерами – решение, найденное численно; тонкая линия относительная погрешность определения формы контура

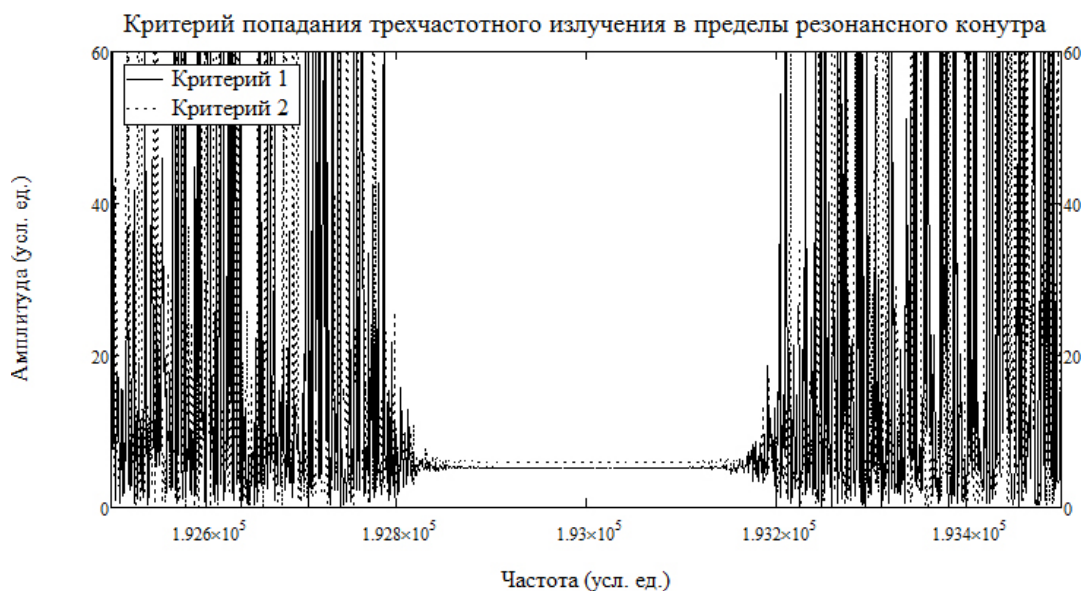


Рис. 6. Критерий попадания трехчастотного сканирования в резонансный контур

## Заключение

Основные результаты математического моделирования можно объединить в совокупности следующих выводов. Трехчастотное сканирование резонансного контура имеет несомненные преимущества в определении амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристики произвольного резонансного контура. Математическая модель позволяет сделать вывод о том, что измерительная система, построенная на основе трехчастотного сканирования, может быть легко реализована для построения реальной измерительной системы. Асимметрия в трехчастотном сканировании не накладывает существенных ограничений как

на величину разноса частот, так и на требования к вычислительным мощностям блока обработки данных.

Оценки максимальной погрешности определения амплитуд в точке сканирования отвечают современным требованиям к построению измерительных систем. Оценочные формулы для определения погрешности, связывающие погрешность вычислений совокупной погрешностью измерительной системы, позволяют сделать подбор элементной базы. Предложенный метод обладает преимуществом критерия попадания всех трех частот асимметричного трехчастотного сигнала в пределы сканируемого резонансного контура.

Восстановление фазово-частотной характеристики требует предварительного восстановления амплитудно-частотной характеристики исследуемого резонансного контура, что может быть осуществлено одновременно при сканировании контура.

### Список литературы

1. Нуреев И.И. Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных волоконно-оптических датчиков: дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2017. 515 с.
2. Сахабутдинов А.Ж. Радиофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах и их применение для решения практических задач: дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2018. 467 с. URL: [http://old.kai.ru/science/disser/files/file\\_244/text\\_diss.pdf](http://old.kai.ru/science/disser/files/file_244/text_diss.pdf) (дата обращения: 11.11.2019).
3. Морозов О.Г. Симметричная двухчастотная рефлектометрия в лазерных системах контроля параметров природной и искусственных сред: дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2004. 333 с.
4. Морозов О.Г., Ильин Г.И., Морозов Г.А. Системы радиофотоники с амплитудно-фазовым модуляционным преобразованием оптической несущей / под ред. О.Г. Морозова. Казань: ООО «Новое знание», 2014. 192 с.
5. Нуреев И.И. Радиофотонные амплитудно-фазовые методы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // Инженерный вестник Дона. 2016. № 2. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581> (дата обращения: 11.11.2019).
6. Нуреев И.И. Статическая и динамическая радиофотонная интеррогация однотипных волоконных брэгговских решеток при полигармоническом зондировании // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 3. С. 69–71.
7. External amplitude-phase modulation of laser radiation for generation of microwave frequency carriers and optical poly-harmonic signals: an overview / O.G. Morozov [et al.] // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9807. P. 980711. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2231948>.
8. Маломодовая симметричная рефлектометрия волоконно-оптических структур / О.Г. Морозов [и др.]. Казань: ЗАО «Новое знание», 2013. 160 с.
9. Polyharmonic analysis of Raman and Mandelstam-Brillouin scatterings and Bragg reflection spectra in Advances in Optical Fiber Technology / O.G. Morozov [et al.]. Rijeka: InTech, 2015. 442 p.
10. Нуреев И.И. Векторный анализатор характеристик волоконных брэгговских решеток на основе амплитудно-фазового преобразования оптической несущей // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18. № 3-2. С. 76–80.
11. Сахабутдинов А.Ж. Характеризация резонанса Фано в рефрактометрических датчиках на основе кольцевых волоконных брэгговских решеток с  $\pi$ -сдвигом. Результаты моделирования // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_235\\_Sakhabutdinov\\_2.pdf\\_ee654e1fa8.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_235_Sakhabutdinov_2.pdf_ee654e1fa8.pdf)

### References

1. Nureev I.I. *Radiophotons polyharmonic system interrogatsii complexed fiber optic sensors*: dissertation for the doctor of technical sciences. Kazan', 2017, 515 p.
2. Sahabutdinov A.Zh. *Radiophotons sensor systems to address fiber Bragg structures and their application to the solution of practical problems*: dissertation for the doctor of technical sciences. Kazan', 2018, 467 p. URL: [http://old.kai.ru/science/disser/files/file\\_244/text\\_diss.pdf](http://old.kai.ru/science/disser/files/file_244/text_diss.pdf) (accessed: 11.11.2019).
3. Morozov O.G. *A symmetric two-frequency reflectometry systems, in laser control parameters natural and artificial environments*: dissertation for the doctor of technical sciences. Kazan', 2004, 333 p.
4. Morozov O.G., Il'in G.I., Morozov G.A. *Radiofotoniki System with Amplitude and Phase Modulation Converting Optical Carrier*. Ed. by O.G. Morozov. Kazan': ООО «Novoe znanie», 2014, 192 p. [In Russian].
5. Nureev I.I. Radiophotons amplitude-phase methods interrogatsii complexed sensors based on fiber Bragg gratings. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2016, no. 2. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581> (accessed: 11.11.2019). [In Russian].
6. Nureev I.I. Static and dynamic radiophotons interrogatsiya the same type of fiber Bragg gratings at polyharmonic probing. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja*, 2016, no. 3, pp. 69–71. [In Russian].
7. Morozov O.G. et al. External amplitude-phase modulation of laser radiation for generation of microwave frequency carriers and optical poly-harmonic signals: an overview. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9807, p. 980711. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2231948>.
8. Morozov O.G. et al. *Few-Symmetric Scatterometry Optical Fiber Structures*. Kazan': ЗАО «Novoe znanie», 2013, 160 p. [In Russian].
9. Morozov O.G. et al. *Polyharmonic analysis of Raman and Mandelstam-Brillouin scatterings and Bragg reflection spectra in Advances in Optical Fiber Technology*. Rijeka: InTech, 2015, 442 p.
10. Nureev I.I. Vector analyzer characteristics of fiber Bragg gratings on the basis of the amplitude-phase conversion optical carrier. *Fizika volnovyh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2015, vol. 18, no. 3-2, pp. 76–80. [In Russian].
11. Sahabutdinov A.Zh. Characterization resonance Fano refractometric sensors based on fiber Bragg gratings ring with  $\pi$ -shift. The simulation results. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2018, no. 2. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_235\\_Sakhabutdinov\\_2.pdf\\_ee654e1fa8.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_235_Sakhabutdinov_2.pdf_ee654e1fa8.pdf). [In Russian].

## A mathematical model for scanning an arbitrary resonant contour by continuous wave three-frequency laser radiation

O.G. Morozov, A.Zh. Sakhabutdinov, I.I. Nureev, V.V. Sadchikov

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

A mathematical model for scanning an arbitrary optical fiber resonance structure with an ultra-narrow spectral shape by a continuous wave three-frequency asymmetric by amplitude signal is proposed. It is shown that the three-frequency asymmetric scanning method has significant advantages over the methods of symmetric poly-harmonic scanning with suppressed carrier. In addition, the proposed method allowing study the spectral characteristics of ultra-narrow resonant circuits, since the method involves measuring beats at the difference frequencies of the initial three-frequency radiation, which can be of the order of several tens of megahertz.

**Keywords:** fiber optic resonant contour; three-frequency probing radiation; asymmetric amplitudes of the probing radiation components; scanning; beat analysis on difference frequencies of probing radiation components.

**Морозов Олег Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, Заслуженный работник Высшей школы РТ, заведующий кафедрой радиодифракции и микроволновых технологий, директор научно-исследовательского института прикладной электродинамики, фотоники и живых систем Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева - КАИ. Автор более 300 научных работ, 5 монографий.

*Область научных интересов:* методы и средства управления параметрами лазерного излучения, метрология волоконно-оптических устройств, волоконная сенсорика, радиодифракция.

*E-mail:* microoil@mail.ru

**Сахабутдинов Айрат Жавдатович**, доктор технических наук, профессор кафедры радиодифракции и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева - КАИ. Автор более 100 научных работ, 1 монография.

*Область научных интересов:* математическое моделирование процессов распространения лазерного излучения в различных средах, решение задач математической физики, волоконная сенсорика, радиодифракция.

*E-mail:* kazanboy@yandex.ru

**Нуреев Ильнур Ильдарович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиодифракции и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева - КАИ. Автор более 100 научных работ, 1 монография.

*Область научных интересов:* оптомеханика оптических волокон и волоконно-оптических устройств, волоконная сенсорика, многочастотные зондирующие системы и комб-генераторы оптического диапазона, радиодифракция.

*E-mail:* n2i2@mail.ru

**Садчиков Валерий Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры радиодифракции и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева - КАИ.

*Область научных интересов:* волоконно-оптические сети, оптические технологии, системы мониторинга на основе оптических датчиков, телекоммуникационные технологии и системы связи.

*E-mail:* microoil@mail.ru