

**Разработка способа компенсации неравномерности оптической мощности и фазовых соотношений на выходах схемы волоконно-оптического интерферометрического датчика на основе 3×3-разветвителя**

**Малмакин А.П.<sup>1</sup>**

**Научный руководитель – к.т.н., Волков А.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Университет ИТМО

**Аннотация**

Работа посвящена исследованию методов пассивной демодуляции сигналов в волоконно-оптических интерферометрических датчиках (ВОИД) на основе оптической схемы с 3×3-разветвителем. Проведено моделирование влияния асимметричных параметров разветвителя на качество демодулированного фазового сигнала. Предложен метод измерения и компенсации нелинейных искажений, обеспечивающий снижение коэффициента гармонических искажений (КГИ).

**Введение**

В современных высокоточных волоконно-оптических интерферометрических измерительных системах требуется обеспечение широкого динамического диапазона для возможности регистрации как крупных, так и малых фазовых сигналов.

Применение оптической схемы на базе 3×3 разветвителя позволяет отказаться от вспомогательной модуляции, обеспечивая работу с интерференционными сигналами в широком частотном диапазоне вплоть до половины частоты дискретизации и в значительно большем динамическом диапазоне амплитуд измеряемых фазовых сигналов по сравнению со способами обработки сигналов на основе гомодинного или гетеродинного приема.

Недостатком данного метода является зависимость амплитуды измеряемого фазового сигнала от параметров 3×3-разветвителя, а именно ассиметричное распределение мощности и разница фазовых смещений между выходными каналами. Для корректной работы алгоритма [1] требуется, чтобы оптическая мощность в трех каналах была одинаковой, а фазовые сдвиги интерференционного сигнала между ними строго соответствовали  $\pm 120^\circ$ . Отклонения от этих условий приводят к увеличению коэффициента гармонических искажений (КГИ) на выходе алгоритма обработки, что ухудшает качество демодуляции фазового сигнала. В связи с этим, исследование способов измерения параметров разветвителя и методов их компенсации является актуальной и важной задачей.

**Основная часть**

Наиболее критичным для алгоритмической компенсации [2] является ассиметричное фазовое смещение между каналами разветвителя, поскольку оптическую мощность можно выровнять при помощи ее регулировки оптическими аттенюаторами.

В работе произведено моделирование и сравнение существующих алгоритмов определения мгновенной фазы каждого канала 3×3-разветвителя: вычисление арккосинуса [3], преобразования Гильберта и Фурье. Для работы данных методов необходима пилообразная вспомогательная модуляция на этапе калибровки.

Альтернативой компенсации ассиметричных параметров 3×3-разветвителя с последующей обработкой является алгоритм коррекции эллипсом [4]. Данный метод не

зависит от рассогласования мощности и разницы фазовых смещений между выходными каналами, однако не может работать в условиях малых воздействующих сигналов [5] и сложен для реализации работы в режиме реального времени в связи с итеративным характером.

В работе предложена модификация оптической схемы ВОИД, заключающаяся в объединении классической схемы интерферометра Майкельсона на основе 3×3-разветвителя с схемой ВОИД с согласованными траекториями. Помимо этого, в работе предлагается объединить классический алгоритм на основе вычисления значений функции арктангенса (PGC-Atan) [6] и модифицированный алгоритм демодуляции интерференционных сигналов на основе полиномиальной компенсации амплитудных и фазовых искажений 3×3-разветвителя [7, 8]. Использование такой комбинации алгоритмов позволит извлечь амплитуды и фазы для каждого из каналов на этапе калибровки и с помощью полиномиального алгоритма компенсировать искажения в процессе эксплуатации измерительной системы, сохранив при этом основные достоинства оптической схемы с 3×3-разветвителем.

### **Выводы.**

В ходе работы были рассмотрены преимущества и недостатки построения ВОИД на основе оптической схемы с 3×3-разветвителем. Предложено изменение оптической схемы, которое позволит измерить асимметричные параметры для последующей компенсации. Дальнейшие планы – это реализация макета и проведение экспериментов для подтверждения метода на практике.

## Литература

1. L.K. Cheng, R. Koops, A. Wielders, W. Ubachs. Development of a Fringe Sensor based on 3x3 Fiber Optic Coupler for Space Interferometry // [2005] 17th International Conference on Optical Fiber Sensors
2. Todd M.D., Seaver M., Bucholtz F. Improved, operationally-passive interferometric demodulation method using 3×3 coupler // Electronics Letters. 2002. Vol. 38, № 15. P. 784–786
3. F. Schliep, R/ Hereth, and G. Schiffner Phase sensitive investigations of 3×3 singlemode fibre directional couplers coupler // Electronics Letters. 1993. Vol. 29, № 1
4. Xi Chen, Yulin Qiu, Weimin Lyu, Zehao Yu, Zhaohui Li, and Changyuan Yu, “Algorithm for interferometric phase signal demodulation using a 3×3 coupler”, Opt. Express **33**(19), pp. 40661-40676 (2025)
5. Gu S, Zhang G, Ge Q, Xu L, Wu X, Yu B. Ameliorated 3 × 3 coupler-based demodulation algorithm using iteratively reweighted ellipse specific fitting. Opt Express. 2024 Jan 15;32(2):1108-1122. doi: 10.1364/OE.501258. PMID: 38297670.
6. T. R. Christian, P. A. Frank, and B. H. Houston, “Real-time analog and digital demodulator for interferometric fiber optic sensors,” Proc. SPIE, vol. 2191, pp. 324–336, May 1994.
7. Zhang H.Y., Zhang M., Wang L.W., Liao Y.B., Wang D.N. Output noise analysis of optical fiber interferometric sensors using a 3×3 coupler // Measurement Science and Technology. 2011. Vol. 22, № 12.
8. Huayong Zhang, Min Zhang, and Yanbiao Liao "Noise floor analysis of the phase demodulation scheme using a 3×3 coupler", Proc. SPIE 8421, OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, 842195 (7 November 2012)