

09.5;13.4

Использование высокочастотной шумоподобной модуляции для снижения дрейфовых процессов в LiNbO₃-фазовом модуляторе волоконно-оптического гироскопа

© Е.В. Востриков, Д.А. Погорелая, А.Н. Никитенко, А.С. Алейник

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: e.v.vostrikov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 6 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 26 июня 2020 г.

Принято к публикации 27 июня 2020 г.

Предложен и исследован способ уменьшения кратковременного дрейфа фазы оптического излучения фазового модулятора LiNbO₃ многофункциональной интегрально-оптической схемы в составе волоконно-оптического гироскопа. Способ заключается в воздействии высокочастотным шумоподобным сигналом электрического напряжения от 20 до 100 МГц на фазовый модулятор вне рабочей частотной полосы волоконно-оптического гироскопа. Оценка эффективности способа показала, что увеличение размаха напряжения шумоподобного сигнала до 1.7 полуволновых напряжений фазового модулятора позволяет уменьшить величину кратковременного дрейфа фазы оптического излучения более чем в 4 раза в полосе до 64.5 кГц.

Ключевые слова: фазовый электрооптический модулятор, волоконно-оптический гироскоп, волоконная оптика, радиофотоника.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.19.50036.18330

В настоящее время широкое распространение получило новое направление науки и техники, которое изучает взаимодействие оптического излучения с высокочастотными электрическими сигналами, — радиофотоника. Принципы построения радиофотонных систем описаны во многих научных работах [1]. Применение радиофотонных технологий способствует созданию новых волоконно-оптических измерительных систем с параметрами, недостижимыми традиционными волоконно-оптическими приборами.

Так, в работе [2] авторам удалось применить радиофотонные технологии для уменьшения дисперсии Аллана для волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) с лазерным источником оптического излучения. Достижение такого результата стало возможным за счет использования дополнительной фазовой модуляции оптического сигнала источника лазерного излучения (ширина полосы генератора гауссовского шума от 10 МГц до 11 GHz по уровню -3 dB [2]), что позволило увеличить ширину спектра оптического излучения и уменьшить влияние обратных отражений, возникающих в оптическом тракте ВОГ. Важность работы [2] заключается в уменьшении дисперсии Аллана ВОГ до уровня, достижимого с использованием широкополосного источника при применении лазерного источника оптического излучения, что потенциально может улучшить стабильность масштабного коэффициента, уменьшить стоимость и сложность ВОГ.

Помимо источника оптического излучения одним из ключевых элементов, который влияет на точностные характеристики ВОГ с замкнутым контуром обратной связи [3], является фазовый электрооптический моду-

лятор (ЭОМ), который, как правило, выполняется в составе многофункциональной интегрально-оптической схемы (МИОС) на основе кристалла ниобата лития (LiNbO₃, НЛ) [4]. МИОС обычно выполняет функции разветвителя оптической мощности, поляризатора и ЭОМ. Анализ научной литературы позволяет выделить следующие паразитные эффекты, которые ограничивают применение МИОС: амплитудные и фазовые искажения оптического сигнала [5–7]. В настоящей работе исследуются фазовые искажения МИОС, вызванные кратковременными дрейфовыми процессами электрического поля в МИОС [4]. Также предложен способ уменьшения величины кратковременного дрейфа (КД) МИОС при использовании высокочастотной фазовой модуляции шумоподобным сигналом.

В работе под КД МИОС подразумевается дрейф фазы оптического сигнала, вызванный дрейфом электрического поля внутри кристалла НЛ, который проявляется в течение сотых долей секунды при скачкообразном изменении электрического напряжения на электродах ЭОМ и служит причиной возникновения „выбросов“ в сигнале ВОГ, возрастания среднеквадратичного отклонения сигнала ВОГ, увеличения времени точностной готовности ВОГ, нелинейности и нестабильности масштабного коэффициента ВОГ, дрейфа сигнала ВОГ и появления мертвой зоны в передаточной характеристике ВОГ [5–7]. Как следует из анализа научно-информационных источников, основными причинами КД являются релаксация внутреннего электрического поля МИОС, подвижность заряженных дефектов и ОН-групп в приповерхностном слое НЛ, перезарядка барьерных

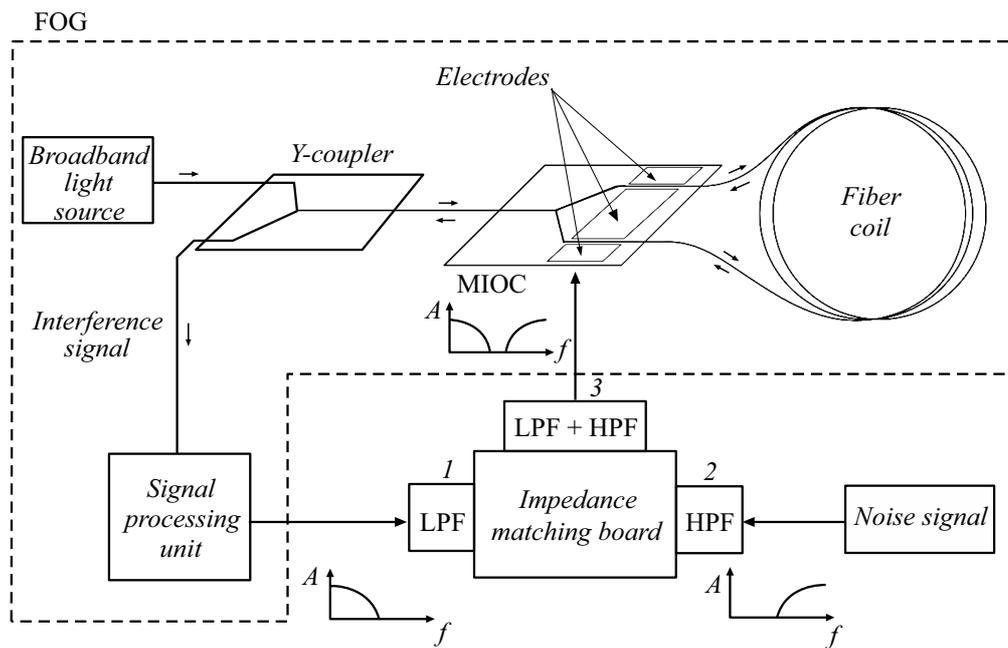


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. LPF — low pass filter (фильтр нижних частот), HPF — high pass filter (фильтр верхних частот), MIOC — multifunction integrated optic circuit (многофункциональная интегрально-оптическая схема), FOG — fiber-optic gyroscope (волоконно-оптический гироскоп).

емкостей на границе электрод–металл [4–7]. Тем не менее, несмотря на большое число научных трудов [6,7], посвященных исследованию МИОС, природа КД в полной мере неясна.

В настоящей работе предложен и исследован способ снижения КД МИОС на подложке из кристалла НЛ. Предложенный способ заключается в воздействии шумоподобным сигналом электрического напряжения вне рабочей частотной полосы ВОГ на МИОС. Рабочая частотная полоса ВОГ ограничена фильтром фотоприемного устройства и составляет 1 МГц. На рис. 1 представлена экспериментальная установка, включающая ВОГ и плату согласования импедансов (ПСИ). В качестве источника шумоподобного сигнала использовался генератор Rigol DG4102 с функцией источника белого шума (верхняя частота генератора составляет 100 МГц). ПСИ разработана согласно рабочей полосе ВОГ и представляет собой аддитивный смеситель частоты. ПСИ необходима для сложения сигнала модуляции ВОГ и высокочастотного шумоподобного сигнала. В связи с тем, что принцип работы ВОГ с замкнутым контуром обратной связи широко известен и представлен во многих научно-информационных источниках [8], большее внимание будет уделено описанию ПСИ и ее характеристикам. ПСИ разработана таким образом, что на порт 1 поступает сигнал модуляции ВОГ, который проходит через фильтр нижних частот с частотой среза $f_{LPF} = 1$ МГц по уровню -3 дБ и подавлением около 60 дБ на частоте 10 МГц. На порт 2 ПСИ поступает шумоподобный сигнал, который проходит через фильтр верхних частот с частотой среза $f_{HPF} = 20$ МГц по уровню -3 дБ и по-

давлением около 45 дБ на частоте 1 МГц. Порт 3 ПСИ является выходным, на нем формируется сумма входных сигналов. Таким образом, с помощью ПСИ на МИОС поступают сигнал модуляции ВОГ и высокочастотный шумоподобный сигнал.

Необходимо отметить, что КД МИОС подвержен воздействию внешних факторов. В большей степени на нестабильность КД МИОС оказывает влияние влажность окружающего воздуха [5–7]. С целью уменьшения влияния внешних воздействий МИОС была покрыта УФ-отверждаемым покрытием Numiseal UV40, предоставленным компанией „Ostec“.

Для оценки КД предлагается использовать импульсную характеристику (ИХ) МИОС. В настоящей работе ИХ МИОС получена в составе ВОГ методом, подробно описанным в [9], однако данную характеристику можно получить другими способами, например с использованием интерферометра Маха–Цендера [4]. На рис. 2, а представлена ИХ МИОС, полученная в диапазоне до 64.5 кГц для разного размаха напряжения шумоподобного сигнала. Частотный диапазон 64.5 кГц выбран исходя из собственной частоты волоконно-оптического контура, которая определяет частоту обработки сигнала ВОГ [8]. Размах шумоподобного сигнала выражен кратно полуволновому напряжению исследуемой МИОС, которое составляет $V_{\pi} = 6$ В. В настоящей работе под полуволновым напряжением МИОС понимается напряжение, необходимое для сдвига фазы интерферометра Саньяка на π радиан. На рис. 2, а ИХ ограничена по вертикали для того, чтобы продемонстрировать характер затухания сигнала. В ходе анализа представленных графиков

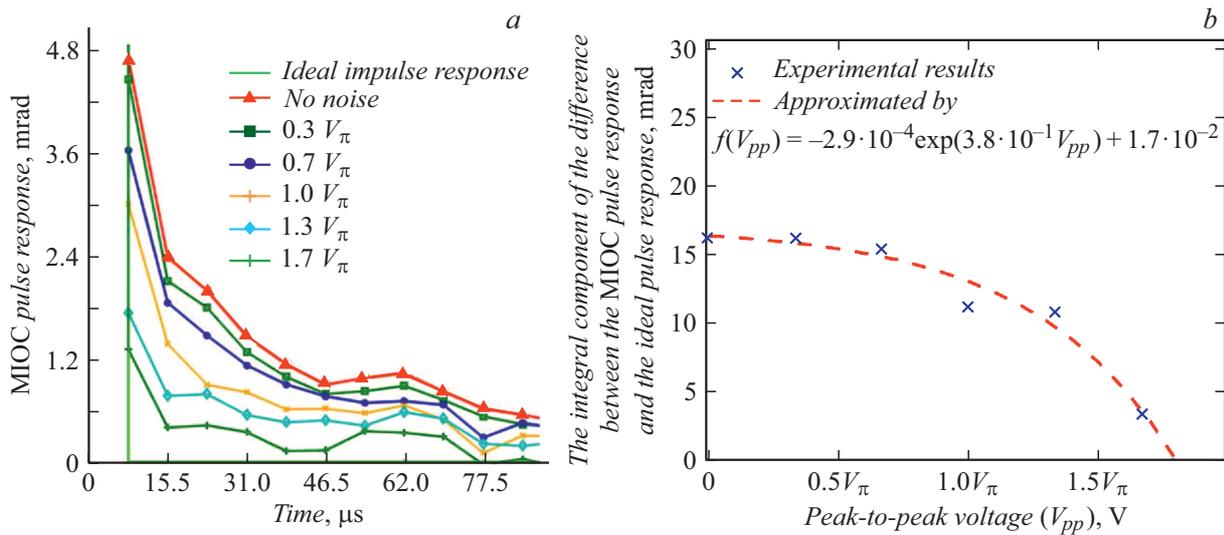


Рис. 2. Импульсная характеристика МИОС при различном напряжении шумоподобного сигнала ($V_{\pi} = 6 \text{ V}$) (a) и оценка кратковременного дрейфа МИОС по интегральной составляющей отклонения импульсной характеристики от идеальной при разном размахе напряжения (V_{pp}) шумоподобного сигнала (b).

выявлено, что при увеличении размаха напряжения шумоподобного сигнала увеличивается крутизна спада ИХ, что свидетельствует об уменьшении КД. Предполагается, что высокочастотный шумоподобный сигнал способствует увеличению скорости перераспределения подвижных заряженных дефектов [4–7] и уменьшению времени КД в МИОС. Для оценки эффективности предложенного способа была рассчитана интегральная составляющая отклонения измеренной ИХ от идеальной. На рис. 2, b построена зависимость интегральной составляющей отклонения ИХ от идеальной при разном размахе напряжения высокочастотного шумоподобного сигнала. Согласно данным рис. 2, с увеличением размаха напряжения шумоподобного сигнала отклонение измеренной ИХ от идеальной ИХ уменьшается. Так, интегральная составляющая отклонения ИХ МИОС от идеальной уменьшилась с 16.0 до 3.7 mrad. Экспериментальные данные были аппроксимированы функцией $f(V_{pp}) = -2.9 \cdot 10^{-4} \exp(3.8 \cdot 10^{-1} V_{pp}) + 1.7 \cdot 10^{-2}$, где V_{pp} — размах напряжения шумоподобного сигнала. Эксперимент проводился при температуре окружающей среды $24 \pm 1^{\circ}\text{C}$, уровне относительной влажности $35 \pm 1\%$ (измерения контролировались гигрометром ИВТМ-7). Следует отметить, что аппаратный тракт ВОГ имеет ровную амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики в полосе частот до 1 МГц, поэтому отклонение измеренной ИХ от идеального отклика в виде дельта-функции обусловлено передаточной функцией МИОС, вкладом аппаратного тракта ВОГ можно пренебречь.

Применение предложенного способа в ВОГ накладывает особые требования на подавление шумоподобного сигнала в рабочей полосе частот. Недостаточная фильтрация сигнала в совокупности с высокой чувствительностью фотоприемника является причиной ошибок

в сигнале ВОГ. Предлагается несколько решений данной проблемы. Одним из возможных решений является увеличение порядка фильтров ПСИ, недостатком которого является увеличение размеров ПСИ, сложности фильтров и возрастание фазовой задержки сигнала, что может стать причиной возникновения генераций в петле отрицательной обратной связи. Также возможным решением является использование ультравысокочастотного или сверхвысокочастотного генератора с полосой частот, превышающей рабочую полосу частот ВОГ, применение которого ограничивает фактор высокой стоимости подобных изделий. В случае вынужденного использования периодических шумоподобных сигналов целесообразно период повторения выбирать исходя из нулей передаточной характеристики интерферометра Саньяка [10], который играет роль частотно-селективного элемента. Предложенные способы позволяют достичь эффективного подавления шумов в рабочей полосе ВОГ.

Таким образом, проведенное исследование показало, что использование дополнительной фазовой модуляции шумоподобным сигналом способствует уменьшению КД МИОС. Степень уменьшения КД МИОС в большей степени зависит от размаха напряжения шумоподобного сигнала и потенциально ограничена характеристиками МИОС. В работе также отмечено, что при использовании предложенного способа в ВОГ необходимо обеспечить эффективное подавление шумоподобного сигнала в рабочей частотной полосе ВОГ.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения представленного способа для улучшения параметров фазового ЭОМ МИОС в составе ВОГ. Предложенный способ является новым в данной области и позволяет уменьшить КД МИОС более чем в 4 раза при размахе напряжения шумоподобного сигнала

1.7 полуволновых напряжений фазового ЭОМ МИОС и частотной полосе шумоподобного сигнала от 20 до 100 МГц, что может применяться для улучшения точностных характеристик ВОГ и других волоконно-оптических датчиков, где необходим ЭОМ на основе кристалла ниобата лития.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание № 2019-0923).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Yi X., Chew S.X., Song S., Nguyen L., Minasian R. // *Photonics*. 2017. V. 4. N 4. P. 1–14.
- [2] Chamoun J., Digonnet M.J.F. // *Opt. Lett.* 2016. V. 42. N 8. P. 1600–1603.
- [3] Lefevre H.C. // *Opt. Fiber Technol.* 2013. V. 19. N 6. P. 828–832.
- [4] Погорелая Д.А. Исследование влияния фазовых и амплитудных искажений оптического сигнала в электрооптическом модуляторе на точностные характеристики волоконно-оптического гироскопа. Канд. дис. СПб.: Университет ИТМО, 2019. 155 с.
- [5] Ponomarev R.S., Zhuravlev A.A., Khrychikov A.A., Shevtsov D.I. Short-term DC-drift in integrated optical Mach–Zehnder interferometer // *Proc of the Optical technologies for telecommunications 2011 (OTT 2011)*. 2012. V. 8410. P. 841008 (1–6).
- [6] Moody J., Morris R. Hermetically packaged LiNbO₃ optical circuit with oxidizing fill gas. Patent 8070368. USA, 2011.
- [7] Thapliya R., Nakamura S., Kikuchi T. // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 93. N 19. P. 193309 (1–3).
- [8] Lefevre H.C. *The fiber-optic gyroscope*. 2nd ed. Artech House, 2014. 391 p.
- [9] Pogorelaya D.A., Aleynik A.S., Nikitenko A.N., Smolovik M.A., Strigalev V.E. // *IEEE Sens. J.* 2019. V. 19. N 19. P. 8733–8740.
- [10] Chan E.H.W., Minasian R.A. // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2005. V. 17. N 8. P. 1740–1742.