

Научная статья

УДК 621.372.2

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178472>

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ РАЗНЕСЕННЫХ ПРИЕМНЫХ КАНАЛОВ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ РАДИОФОТОНИКИ

Андрей Александрович Емельянов^{1✉}, Иван Владимирович Унченко²

^{1,2}МИРЭА – Российский технологический университет,

Москва, Россия

¹АО «КНИРТИ» – Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт,

Жуков, Калужская область, Россия

¹nd1794@yandex.ru✉

²unchenkoivan@gmail.com

Аннотация. Произведена практическая оценка степени влияния шумовых характеристик ВОЛС, в основе которой лежит модуляция лазерного излучения посредством электроабсорбции, на качество сигнала системы синхронизации, сопоставление расчетных и измеренных шумовой и передаточной характеристик системы синхронизации, построенной на основе ВОЛС для радиointерферометра. Расчетное значение коэффициента передачи и шума для системы, с учетом применяемых усилителей, составило не более 16 дБ и не менее 24 дБ соответственно.

По результатам измерений коэффициент передачи составил величину от 13 до минус 3 дБ, а коэффициент шума — не менее 30 дБ, полученные расхождения обусловлены нелинейностью электрооптического преобразования посредством электроабсорбции и нелинейностью фотодиода. Измерен вносимый фазовый шум системы синхронизации на частотах 1, 5 и 10 ГГц. Определена величина вносимой фазовой ошибки волоконно-оптической линии связи, которая составила: для 1 и 5 ГГц – не более 0,056 градуса, а для 10 ГГц – не более 0,176 градуса.

Ключевые слова: радиоинтерферометр, радиофотоника, синхронизация, разностно-фазовые ошибки, лазер, джиттер

Для цитирования: Емельянов А.А., Унченко И.В. Исследование макета перспективной системы синхронизации разнесенных приемных каналов радиоинтерферометра с использованием технологии радиофотоники // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178472>

Original article

RESEARCH OF THE LAYOUT OF A PROMISING SYSTEM FOR SYNCHRONIZATION OF DIVERSITY RECEIVING CHANNELS OF A RADIO INTERFEROMETER USING MICROWAVE PHOTONICS TECHNOLOGY

Andrey A. Emelyanov^{1✉}, Ivan V. Unchenko²

^{1,2}MIREA - Russian technological university,

Moscow, Russia

¹JSC "KNIRTI" - Kaluga Scientific Research Radio Engineering Institute,
Zhukov, Kaluga region, Russia

¹nd1794@yandex.ru✉

²unchenkoivan@gmail.com

Abstract. High-precision measurement of the angular coordinates of radio emission sources is the cornerstone task of modern digital radio interferometers. The main measured parameter in these devices is the totality of the phase differences of the signal received and digitized by spaced receiving channels. To achieve high measurement accuracy, it is necessary first to minimize the difference-phase errors in digitizing the received signal by spaced receiving channels. In addition, the placement of radio interferometers at most objects involves solving the problems of minimizing the size of the system, its weight, power consumption and cost. To optimally solve these problems, it is proposed to use fiber-optic communication lines (FOCL) with their own low phase noise, which is based on modulation of laser radiation through electroabsorption.

The purpose of this work is a practical assessment of the degree of influence of the noise characteristics of a fiber-optic link, which is based on the modulation of laser radiation through electroabsorption, on the quality of the synchronization system signal and a comparison of the calculated and measured noise and transmission characteristics of the transmission path of the synchronization system of spaced receiving channels of a fiber-optic interferometer radio interferometer.

The object of study was: a model of the transmission path of the synchronization system (hereinafter referred to as the system). The research was carried out using a

calculation-analytical method and through practical measurements using a phase noise analyzer, a network analyzer, and a signal analyzer.

During the work, transmission and noise coefficients for the system were calculated. Taking into account the amplifiers used, the calculated value of the transmission coefficient was no more than 16 dB and no less than 24 dB for the noise figure. According to the measurement results, the transmission coefficient was from 13 to minus 3 dB, and the noise figure was at least 30 dB; the resulting discrepancies are due to the nonlinearity of electro-optical conversion through electroabsorption and the nonlinearity of the photodiode. The introduced phase noise of the synchronization system was measured at frequencies of 1, 5 and 10 GHz. The value of the introduced phase error of the fiber-optic communication line was determined, which was: for 1 and 5 GHz - no more than 0.056 degrees, and for 10 GHz - no more than 0.176 degrees.

Keywords: radio interferometer, microwave photonics, synchronization, difference-phase errors, laser, jitter

For citation: Emelyanov A.A., Unchenko I.V. Research of the layout of a promising system for synchronization of diversity receiving channels of a radio interferometer using microwave photonics technology. *Trudy MAI*, 2024, no. 134. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178472>

Высокоточное измерение пеленга источников излучения радиосигнала является краеугольной задачей современных цифровых радиоинтерферометров [1, 2]. Одним из наиболее существенных параметров, измеряемых в этих устройствах, выступает совокупность разностей фаз сигнала, принимаемого и оцифровываемого

разнесенными в пространстве приемными каналами. Для достижения высокой точности измерения необходимо в первую очередь минимизировать разностно-фазовые ошибки оцифровки принимаемого данными каналами сигнала. Кроме того, размещение радиоинтерферометров на большинстве объектов сопряжено с решением задач минимизации размеров системы, ее веса, потребляемой мощности [3] и стоимости. Для оптимального решения указанных задач предлагается использование волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) с собственными низкими фазовыми шумами, в основе которых лежит модуляция лазерного излучения посредством электроабсорбции.

Цель данной работы – практическая оценка степени влияния шумовых характеристик ВОЛС, в основе которой лежит модуляция лазерного излучения посредством электроабсорбции, на качество сигнала синхронизации, сопоставление расчетных и измеренных шумовой и передаточной характеристик тракта передачи системы синхронизации разнесенных приемных каналов радиоинтерферометра ВОЛС.

В качестве объекта исследования были использованы: макет тракта передачи системы синхронизации (далее – системы). Измерения проводились с помощью анализатора уровня фазового шума, анализатора цепей, анализатора сигналов.

В ходе работы были рассчитаны коэффициенты передачи и шума для системы. С учетом применяемых усилителей, расчетное значение коэффициента передачи составило не более 16 дБ и не менее 24 дБ для коэффициента шума. По результатам измерений коэффициент передачи составил величину от 13 до минус 3 дБ, а коэффициент шума — не менее 30 дБ, полученные расхождения обусловлены

нелинейностью электрооптического преобразования посредством электроабсорбции и нелинейностью фотодиода. Измерен вносимый фазовый шум системы синхронизации на частотах 1, 5 и 10 ГГц. Определена величина вносимой фазовой ошибки волоконно-оптической линии связи, которая составила: для 1 и 5 ГГц – не более 0,056 градуса, а для 10 ГГц – не более 0,176 градуса.

В [4] был рассмотрен принцип минимизации разностно-фазовых ошибок оцифровки принимаемого сигнала АЦП разнесенных приемных каналов радиоинтерферометра за счет использования в системе распределения сигналов тактовой частоты АЦП ВОЛС одинаковой электрической длины, и приведены рекомендации по расчету цепей для данного способа передачи, в основе которого лежит принцип непосредственной модуляции лазерного излучения. Однако данный способ имеет ограничения в части дальности передачи сигнала (не более 100 м) и частоты (не более 10 ГГц) [5]. Одним из вариантов развития построения систем синхронизации с использованием технологий радиофотоники может быть использование внешней модуляции на основе электроабсорбционного модулятора (ЭАМ), поскольку в этом случае обеспечивается возможность передачи сигнала на расстояние до 10 км, возможность дальнейшего расширения диапазона частот до 110 ГГц, малые габариты из-за интегрального исполнения ЭАМ и лазера, низкая стоимость [6].

ЭАМ представляет собой полупроводниковое устройство, которое можно использовать для модуляции интенсивности лазерного луча с помощью электрического напряжения. Как правило, данный модулятор изготавливается в

интегральном исполнении с лазером. Схематичное представление данного исполнения представлено на рисунке 1 [7].

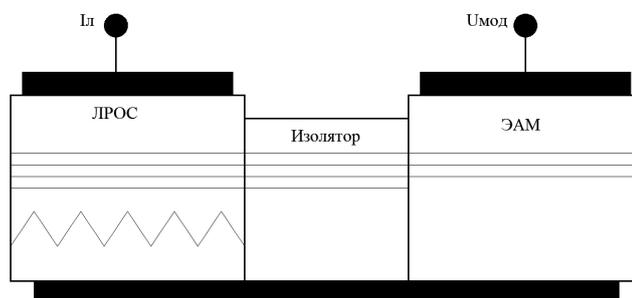


Рисунок 1. Схематичное представление лазера с распределенной обратной связью (ЛРОС) интегрированного с ЭАМ

Схема состоит из трех секций: ЛРОС, ЭАМ и секции изоляции электродов.

Механизмы электроабсорбции бывают двух типов: эффект Франца-Келдыша, наблюдаемый в обычных объемных полупроводниках, квантово-размерный эффект Штарка структуры с квантовыми ямами. Оба этих эффекта заметны вблизи ширины, запрещенной зоны полупроводников.

Эффект Франца-Келдыша — изменение оптического поглощения полупроводника при приложении к нему электрического поля. При отсутствии электрического поля имеет место минимальное поглощение и большое поглощение при приложении электрического поля. Когда приложено электрическое поле, энергетические зоны наклоняются, и эффективная ширина запрещенной зоны становится меньше, чем ширина запрещенной зоны при нулевом электрическом поле. Таким образом, электроны совершают переход из валентной зоны в зону проводимости [8].

Влияние электрического поля на спектр поглощения или излучения света квантовой ямы описывает эффект Штарка. Когда нет электрического поля, электроны и дырки находятся внутри квантовой ямы и занимают состояния в пределах дискретного набора энергетических подзон. Таким образом, система может поглощать или излучать только дискретный набор частот света. При приложении внешнего электрического поля состояния электронов смещаются в сторону более низких энергий, а состояния дырок — в сторону более высоких энергий. Это снижает допустимые частоты поглощения или излучения света. За счет приложения внешнего электрического поля электроны и дырки смещаются в противоположные стороны ямы. Таким образом, перекрытие уменьшается, что, в свою очередь, снижает эффективность рекомбинации системы [9].

При внешней модуляции посредством ЭАМ в обобщенном виде коэффициент передачи и коэффициент шума с учетом потерь в оптоволоконном тракте записывается согласно выражениям (1) и (2) [10, 11]:

$$g = \left[\left(\frac{p_L t_i t_o T_o R_d \pi}{2V_{\pi e}} \right)^2 R_D R_L \right] \left[\frac{4R_S R_L}{(R_L + R_S)^2} \right] \left[\frac{1}{1 + \frac{p_L t_i \eta_M}{2V_{\pi e}} \left(R_M + \frac{R_L R_S}{R_L + R_S} \right)} \right]^2 \quad (1)$$

$$F_N = 1 + \frac{f_R}{g} + \frac{2qp_L t_i t_B t_o \eta_D R_d}{gkT} + \frac{qp_L t_i \eta_M (1 - t_B) R_S \left[1 + \frac{R_M (R_L + R_S)}{R_L R_S} \right]^2}{2kT} \quad (2)$$

где p_L – мощность лазера; t_i – потери оптического сигнала при вводе излучения в ЭАМ; t_o – потери оптического сигнала при выводе излучения после процесса; t_B – точка приложения напряжения смещения; η_D – чувствительность фотодетектора; $V_{\pi e}$ – приложенная точка смещения; R_M – входное сопротивление ЭАМ; R_D – выходное

сопротивление фотодиода; R_S – выходное сопротивление источника сигнала; R_L – сопротивление входа СВЧ сигнала; η_M – чувствительность модулятора в точке смещения; f_R – коэффициент шума приёмника; q – элементарный заряд, k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, T_0 – потери в оптоволоконном тракте.

Выбор расчетных параметров

При проектировании в целях уменьшения габаритов был выбран лазер ЛРОС с встроенным ЭАМ марки DFB-1550-EAM-12. Типичная характеристика чувствительности модулятора в точке смещения для данного устройства приведена на рисунке 2 [12]. В соответствии с рисунком 3 с учетом рабочего диапазона частот от 100 МГц до 12 ГГц для дальнейших расчетов значение чувствительности модулятора в точке смещения было принято 0 дБ.

Потери в оптоволоконном тракте в данном случае складываются из потерь, вызванных неоднородностью среды передачи сигнала при соединении патчкордов (0,5 дБ [13]), и потерь в самом оптоволокне длиной 1 км (1 дБ [14]). Таким образом, общие потери составят 1,5 дБ.

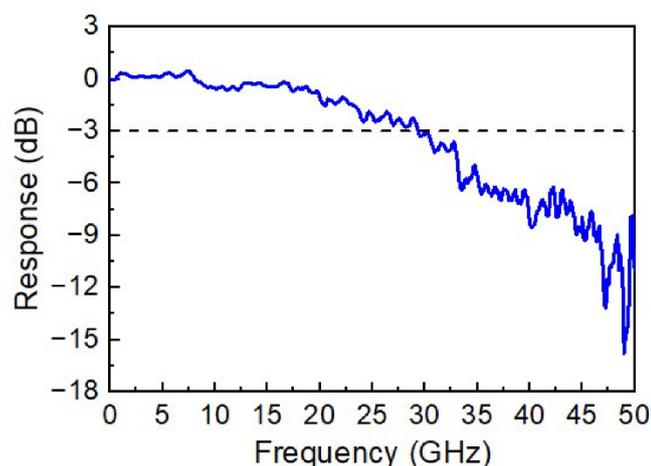


Рисунок 2. Частотная характеристика чувствительности ЭАМ с интегрированным лазером с РОС [12]

DFB-1550-EAM-12 имеет следующие характеристиками: напряжение смещения минус 1 В, оптическая выходная мощность 3 мВт, входное волновое сопротивление 50 Ом. С учетом того, что потери на ввод и вывод излучения равны и составляют 3 дБ [15], мощность лазера на входе ЭАМ составит порядка 10 мВт.

В качестве фотодиода использован 2522 ф. Emcore с чувствительностью 0,7 А/Вт, выходным волновым сопротивлением 50 Ом и рабочим диапазоном от 10 МГц до 20 ГГц [16]. Применение данного диода обусловлено дальнейшим планируемым расширением диапазона рабочих частот до 20 ГГц.

Для компенсации потерь электрооптического, оптоэлектронного преобразования и снижения коэффициента шума были применены малозумящие высокочастотные усилители, перекрывающие диапазон рабочих частот от 100 МГц до 12 ГГц с коэффициентом шума не более 3 дБ и коэффициентом передачи 14 дБ.

Таким образом, итоговая схема имеет структуру, которая представлена на рисунке 3.

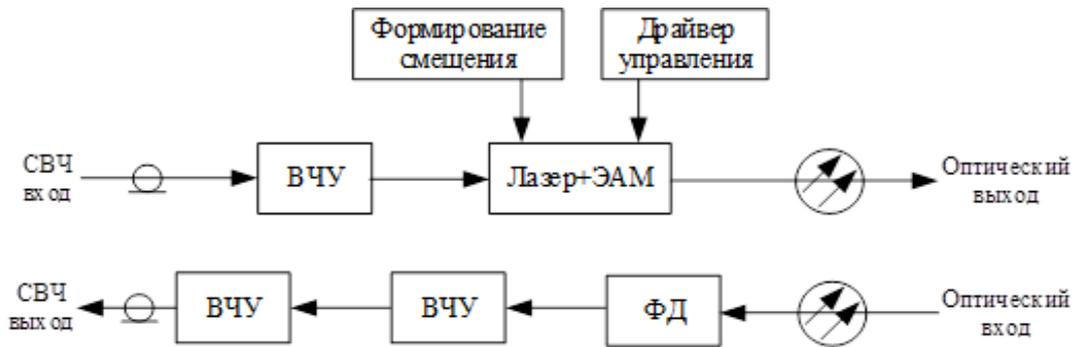


Рисунок 3. Структурная схема: ВЧУ – высокочастотный усилитель, лазер +ЭАМ – интегрированная фотонная интегральная схема, состоящая из непрерывного лазера и ЭАМ, ФД – фотодиод

С учетом характеристик усилителей значения коэффициента передачи и коэффициента шума, вычисленные по формулам (1) и (2), составят не более 16 дБ и не менее 24 дБ соответственно.

Измерение коэффициента шума и передачи

Для проведения экспериментальных исследований в части измерений коэффициента передачи и коэффициента шума был собран стенд, структурная схема которых представлены на рисунке 5 соответственно.

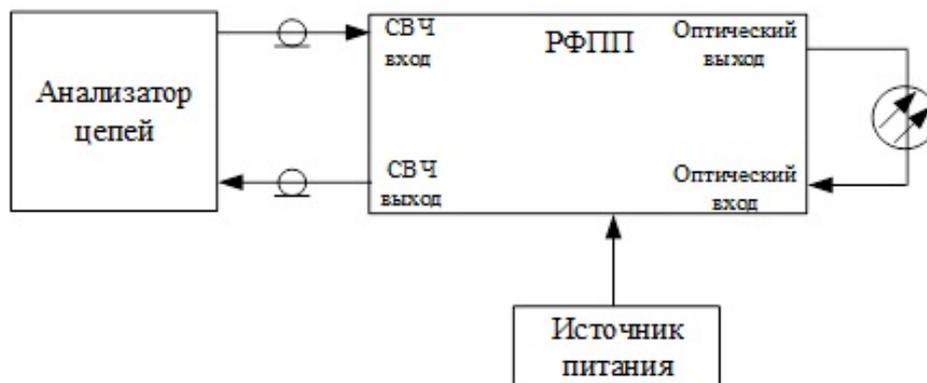


Рисунок 4. Структурная схема стенда для измерения коэффициента передачи

В состав стенда для измерения коэффициента передачи входят: анализатор цепей, источник питания, радиофотонный приемо-передатчик (РФПП),

оптоволоконный кабель длиной 1 км. Все измерения проводились после предварительной калибровки в диапазоне частот от 100 МГц до 12 ГГц. Для измерения коэффициента шума анализатор цепей заменяется на измеритель коэффициента шума. Результаты измерений коэффициента передачи и коэффициента шума приведены на рисунках 5 и 6 соответственно.

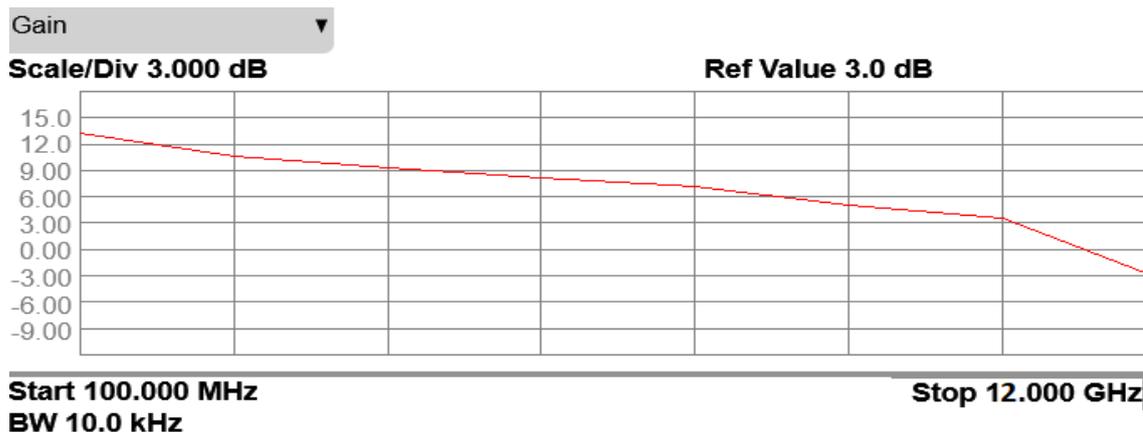


Рисунок 5. Измеренный коэффициент передачи

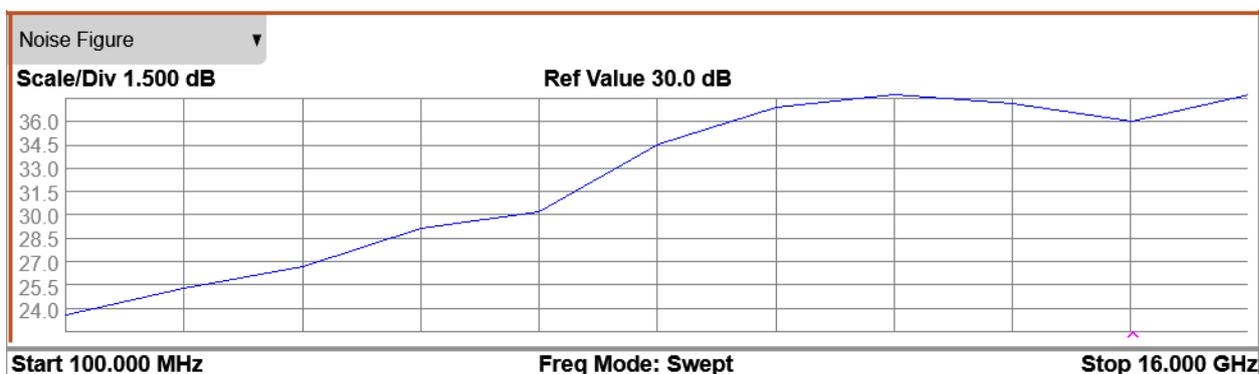


Рисунок 6. Измеренный коэффициент шума

Как видно из рисунка 5, значение измеренного коэффициента передачи составляет не более 13 дБ и спадает до минус 3 дБ на частоте 12 ГГц, коэффициент шума принимает значение 24 дБ, а с увеличением частоты поднимается до 38 дБ, при этом расчетные значения коэффициента передачи и шума составили не более 16 дБ и

не менее 24 дБ соответственно, что является близким значениями к измеренным и говорит о правильности методики приведенного расчета.

Измерение собственного фазового шума радиотонной линии

Для проведения экспериментальных исследований в части измерений собственного фазового шума был собран стенд, структурная схема которого представлена на рисунке 7.

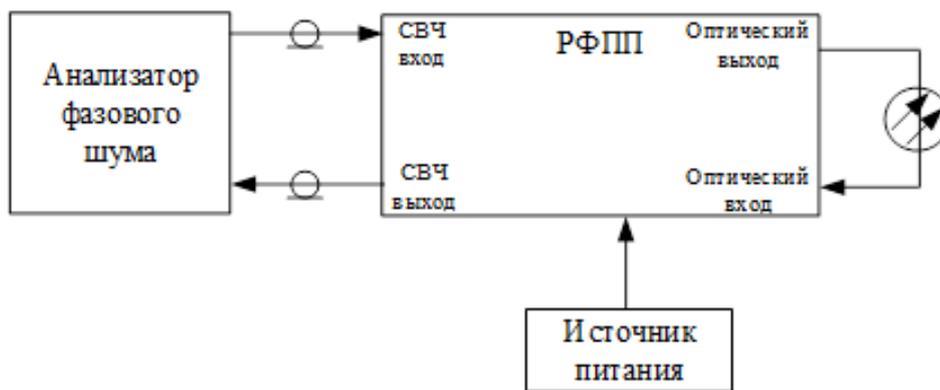


Рисунок 7. Структурная схема стенда для измерения собственного фазового шума

Собственный фазовый шум системы был поочередно измерен на частотах 1 ГГц, 5 ГГц, 10 ГГц, полученные значения представлены на рисунках 8, 9, 10 соответственно.

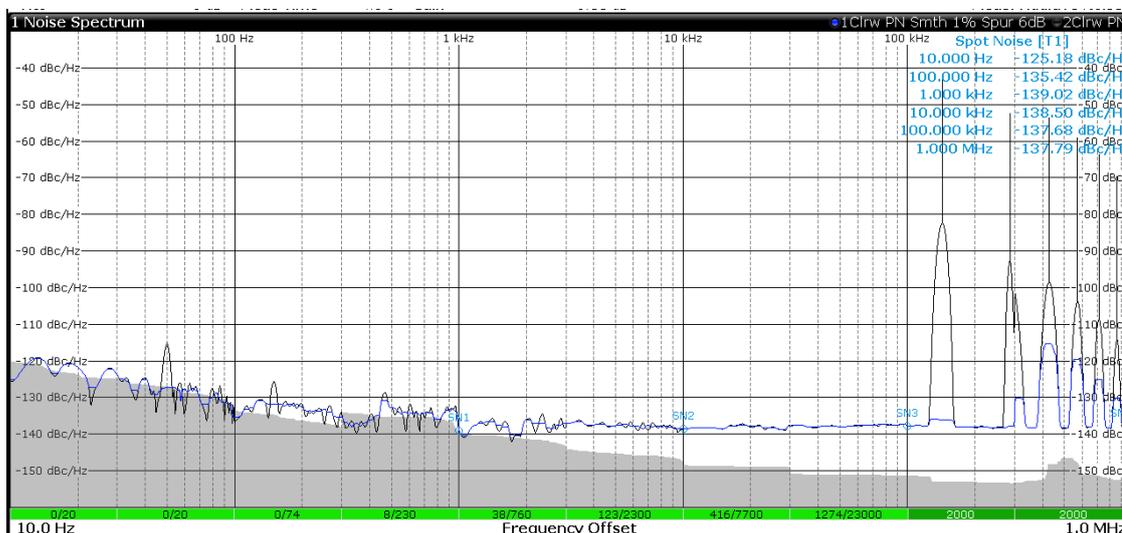


Рисунок 8. Измеренный собственный фазовый шум на частоте 1 ГГц

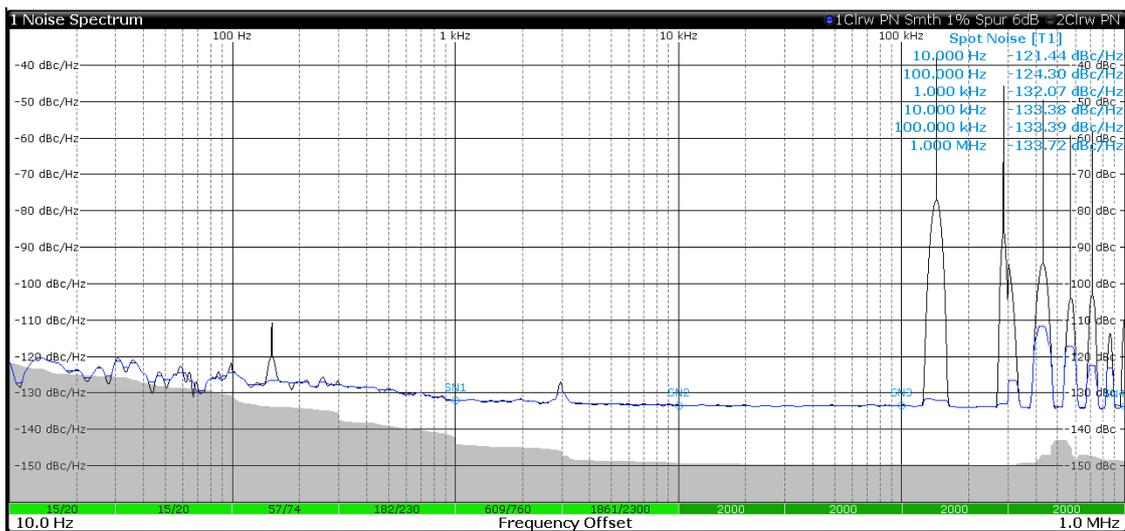


Рисунок 9. Измеренный собственный фазовый шум на частоте 5 ГГц

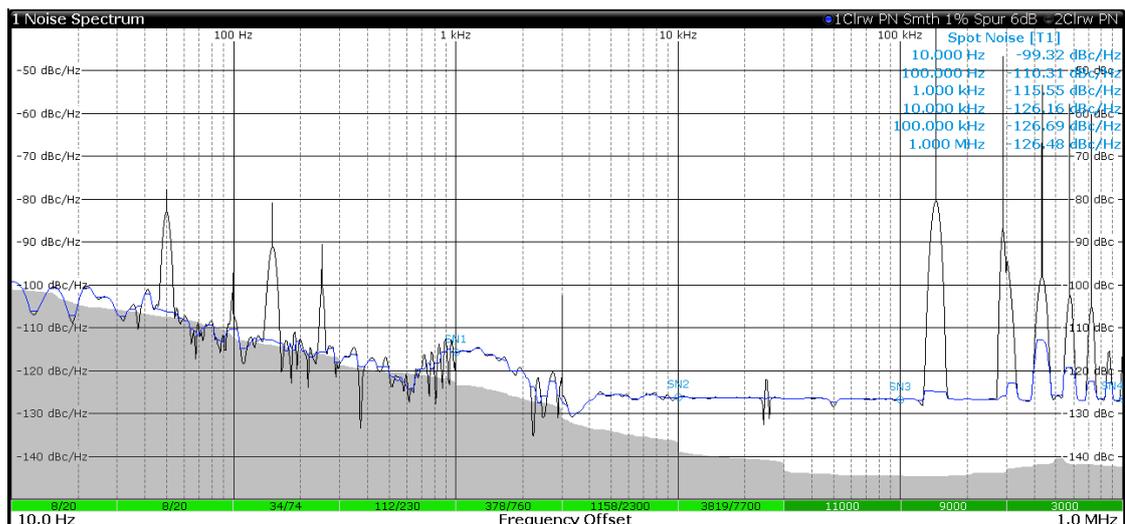


Рисунок 10. Измеренный собственный фазовый шум на частоте 10 ГГц

Как видно из рисунков, система синхронизации, построенная на ЭАМ, имеет низкие собственные фазовые шумы в широком диапазоне частот, и более широкий рабочий частотный диапазон, чем система синхронизации, описанная в [17], при этом собственная вносимая фазовая ошибка для 1 и 5 ГГц составляет не более 0,056 градуса, для 10 ГГц – не более 0,176 градуса.

Аналогичные исследования проводились в [18-21], объектом исследований выступала радиофотонная линия передач, где в качестве элемента модуляции оптического излучения выступал модулятор Маха-Цендера (ММЦ). Результаты данных исследований показали высокую равномерность коэффициента передачи радиофотонной линии (неравномерность коэффициента передачи порядка ± 3 дБ в диапазоне частот до 20 ГГц). Тем не менее, радиофотонная линия передачи с применением ММЦ обладает такими недостатками как: большие габариты, наличие внешнего лазера, высокая стоимость технического решения, что затрудняет ее применение при построении бортовых систем связи, радиолокации и радиомониторинга и при этом не было проведено исследований на предмет собственных фазовых шумов радиофотонной линии, данный фактор является одной из определяющих характеристик при построении систем синхронизации.

Предлагаемое решение с использованием ЭАМ имеет несколько худшие показатели в части равномерности коэффициента передачи (неравномерность коэффициента передачи порядка ± 5 дБ в диапазоне частот до 12 ГГц), но за счет интегрального исполнения ЭАМ и лазера значительно упрощается схемная реализация радиофотонной линии. Данный фактор положительно сказывается на габаритах бортовых систем связи, радиолокации и радиомониторинга [22].

Выводы

Таким образом, исследования макета системы синхронизации показали возможность распределения единого тактового сигнала от одного источника на расстояние до десятка километров и передачи на устройства обработки сигналов

синхронизации, при этом значение вносимой фазовой ошибки составит для 1 и 5 ГГц не более 0,056 градуса, для 10 ГГц – не более 0,176 градуса. При этом, по результатам измерений коэффициент передачи составил величину от 13 до минус 3 дБ, а коэффициент шума — не менее 30 дБ, расчетное значение коэффициента передачи составило не более 16 дБ и не менее 24 дБ для коэффициента шума. Полученные расхождения обусловлены нелинейностью электрооптического преобразования посредством электроабсорбции и нелинейностью фотодиода.

Список источников

1. Бирюков И.Д. Разработка совместного оптимального алгоритма обработки радиосигналов источников радиоизлучения авиационным средством радиотехнического наблюдения // Труды МАИ. 2023. № 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173025>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-13](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-13)
2. Хазов А.С. и др. Методика оценивания разрешающей способности космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны с учетом компенсации атмосферных искажений // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=169001>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-15)
3. Каменский К.В. Влияние траекторных нестабильностей и характеристик бортовой навигационной системы на качество радиолокационного изображения при синтезировании апертуры // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168186>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-14)

4. Емельянов А.А. Построение фазостабильной системы синхронизации АЦП разнесенных приемных каналов радиоинтерферометра с использованием элементов радиофотоники // Радиотехника. 2018. № 11. С. 110-114. DOI: [10.18127/j00338486-201811-18](https://doi.org/10.18127/j00338486-201811-18)
5. Hunsperger R. Direct Modulation of Semiconductor Lasers, 2009. DOI: [10.1007/b98730_16](https://doi.org/10.1007/b98730_16)
6. Prasad Saurabh, Ghatol Ashok. RADIO OVER FIBER TECHNOLOGY USING ELECTRO-ABSORPTION MODULATION // International Journal of Engineering Science and Technology, 2010, vol. 2 (10).
7. Hazra Pranab, Bhattacharya Sayantani, Pal Soumen. Effect of noise on Electro Absorption Modulator (EAM) and optimization - Used for optical communication // Conference: Emerging Trends and Applications in Computer Science (ICETACS), 2013. DOI: [10.1109/ICETACS.20136691394](https://doi.org/10.1109/ICETACS.20136691394)
8. Duque-Gomez Federico, Sipe J. The Franz-Keldysh effect revisited: Electroabsorption including interband coupling and excitonic effects // Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2014, vol. 76. DOI: [10.1016/j.jpms.2014.07.023](https://doi.org/10.1016/j.jpms.2014.07.023)
9. Pedersen Thomas, Cornean Horia. Enhanced Stark Effect in Dirac Materials // Journal of Physics: Condensed Matter, 2022, vol. 34. DOI: [10.1088/1361-648X/ac8a34](https://doi.org/10.1088/1361-648X/ac8a34)
10. Betts Gary, Xie X.B., Shubin Ivan, Chang W.S.C., Yu Paul. Gain Limit in Analog Links Using Electroabsorption Modulators // Photonics Technology Letters, IEEE, 2006, vol. 18, pp. 2065-2067. DOI: [10.1109/LPT.2006.883292](https://doi.org/10.1109/LPT.2006.883292)

11. Shin D.-S. Gain-bandwidth relation of electroabsorption-modulated analogue fibre link: Effect of photocurrent resistance // Electronics Letters, 2012, no. 48 (7), pp. 387-389. DOI: [10.1049/el.2012.0057](https://doi.org/10.1049/el.2012.0057)
12. Zhou Daibing, Liang Song, Zhang Ruikang, Yang Qiulu et al. 50 Gb/s Electro-Absorption Modulator Integrated with a Distributed Feedback Laser for Passive Optical Network Systems // Photonics, 2022, no. 9 (10), pp. 780. DOI: [10.3390/photonics9100780](https://doi.org/10.3390/photonics9100780)
13. Chandrappan J., Zhang J., Ramana P., et al. Cost effective Optical Coupling for Enhanced Data Rate POF Communications // Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering, 2008. DOI: [10.1117/12.764338](https://doi.org/10.1117/12.764338)
14. Rahman M.M., Khan M.H.R., Yesmin L., Khan S. Analyzing the optimum loss and dispersion of different types of optical fibers, Khulna University Studies. 2022, 193-198. DOI: [10.53808/KUS.2007.8.2.0339-E](https://doi.org/10.53808/KUS.2007.8.2.0339-E)
15. Fukushima S., Uezono T., Ohshima S., Watanabe T., Nagayama T. Optoelectronic Frequency Conversion Employing an Electro-Absorption Modulated Laser for a Cube Satellite Earth Station // Conference: 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), 2018, pp. 257-261. DOI: [10.23919/PIERS.2018.8598042](https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8598042)
16. Emcore 5021TR Installation Manual. URL: <https://guidessimo.com/document/654316/emcore-5021tr-installation-manual-11.html>
17. Емельянов А.А., Топорков Н.В. Исследование макета фазостабильной системы синхронизации АЦП разнесенных приемных каналов радиointерферометра с использованием технологий радиофотоники // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 11. С. 86-90.

18. Muniz A.L., Noque D.F., Borges R.M., Bogoni A., Hirano M. et al. All-optical RF amplification toward Gpbs communications and millimeter-waves applications // *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, vol. 59 (9), pp. 2185-2189. DOI: [10.1002/mop.30704](https://doi.org/10.1002/mop.30704)
19. Петров А.Н., Тронев А.В., Лебедев В.В., Ильичев И.В., Величко Е.Н., Шамрай А.В. Повышение коэффициента передачи радиочастотной волоконнооптической линии за счет управления рабочей точкой внешнего модулятора // *Журнал технической физики*. 2015. № 85 (5). С. 131-136.
20. Валуев В.В. и др. Универсальный радиофотонный приемный канал микроволнового диапазона // *Радиотехника и электроника*. 2018. № 63 (9). С. 1020-1028.
21. Таценко И.Ю. и др. Исследование характеристик фотодетектора с высоким фототоком при передаче сверхвысокочастотного радиосигнала по оптоволокну // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. 2020. № 23 (4). С. 48-56.
22. Unchenko I.V., Emelyanov A.A. Photonics-based modular multistate digital coherent system // *Russian Technological Journal*, 2022, vol. 10 (4), pp. 27-37. DOI: [10.32362/2500-316X-2022-10-4-27-37](https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-27-37)

References:

1. Biryukov I.D. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=173025>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-13](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-13)
2. Khazov A.S. et al. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=169001>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-15)

3. Kamenskii K.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168186>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-14)
4. Emel'yanov A.A. *Radiotekhnika*, 2018, no. 11, pp. 110-114. DOI: [10.18127/j00338486-201811-18](https://doi.org/10.18127/j00338486-201811-18)
5. Hunsperger R. *Direct Modulation of Semiconductor Lasers*, 2009. DOI: [10.1007/b98730_16](https://doi.org/10.1007/b98730_16)
6. Prasad Saurabh, Ghatol Ashok. RADIO OVER FIBER TECHNOLOGY USING ELECTRO-ABSORPTION MODULATION, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, vol. 2 (10).
7. Hazra Pranab, Bhattacharya Sayantani, Pal Soumen. Effect of noise on Electro Absorption Modulator (EAM) and optimization - Used for optical communication, *Conference: Emerging Trends and Applications in Computer Science (ICETACS)*, 2013. DOI: [10.1109/ICETACS.20136691394](https://doi.org/10.1109/ICETACS.20136691394)
8. Duque-Gomez Federico, Sipe J. The Franz-Keldysh effect revisited: Electroabsorption including interband coupling and excitonic effects, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2014, vol. 76. DOI: [10.1016/j.jpics.2014.07.023](https://doi.org/10.1016/j.jpics.2014.07.023)
9. Pedersen Thomas, Cornean Horia. Enhanced Stark Effect in Dirac Materials, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2022, vol. 34. DOI: [10.1088/1361-648X/ac8a34](https://doi.org/10.1088/1361-648X/ac8a34)
10. Betts Gary, Xie X.B., Shubin Ivan, Chang W.S.C., Yu Paul. Gain Limit in Analog Links Using Electroabsorption Modulators, *Photonics Technology Letters*, IEEE, 2006, vol. 18, pp. 2065-2067. DOI: [10.1109/LPT.2006.883292](https://doi.org/10.1109/LPT.2006.883292)

11. Shin D.-S. Gain-bandwidth relation of electroabsorption-modulated analogue fibre link: Effect of photocurrent resistance, *Electronics Letters*, 2012, no. 48 (7), pp. 387-389. DOI: [10.1049/el.2012.0057](https://doi.org/10.1049/el.2012.0057)
12. Zhou Daibing, Liang Song, Zhang Ruikang, Yang Qiulu et al. 50 Gb/s Electro-Absorption Modulator Integrated with a Distributed Feedback Laser for Passive Optical Network Systems, *Photonics*, 2022, no. 9 (10), pp. 780. DOI: [10.3390/photonics9100780](https://doi.org/10.3390/photonics9100780)
13. Chandrappan J., Zhang J., Ramana P., et al. Cost effective Optical Coupling for Enhanced Data Rate POF Communications, *Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering*, 2008. DOI: [10.1117/12.764338](https://doi.org/10.1117/12.764338)
14. Rahman M.M., Khan M.H.R., Yesmin L., Khan S. *Analyzing the optimum loss and dispersion of different types of optical fibers*, Khulna University Studies. 2022, 193-198. DOI: [10.53808/KUS.2007.8.2.0339-E](https://doi.org/10.53808/KUS.2007.8.2.0339-E)
15. Fukushima S., Uezono T., Ohshima S., Watanabe T., Nagayama T. Optoelectronic Frequency Conversion Employing an Electro-Absorption Modulated Laser for a Cube Satellite Earth Station, *Conference: 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama)*, 2018, pp. 257-261. DOI: [10.23919/PIERS.2018.8598042](https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8598042)
16. *Emcore 5021TR Installation Manual*. URL: <https://guidessimo.com/document/654316/emcore-5021tr-installation-manual-11.html>
17. Emel'yanov A.A., Toporkov N.V. *Radiotekhnika*, 2022, vol. 86, no. 11, pp. 86-90.
18. Muniz A.L., Noque D.F., Borges R.M., Bogoni A., Hirano M. et al. All-optical RF amplification toward Gpbs communications and millimeter-waves applications, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, vol. 59 (9), pp. 2185-2189. DOI: [10.1002/mop.30704](https://doi.org/10.1002/mop.30704)

19. Petrov A.N., Tronev A.V., Lebedev V.V., Il'ichev I.V., Velichko E.N., Shamrai A.V. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2015, no. 85 (5), pp. 131-136.
20. Valuev V.V. et al. *Radiotekhnika i elektronika*. 2018, no. 63 (9), pp. 1020-1028.
21. Tatsenko I.Yu. et al. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika*, 2020, no. 23 (4), pp. 48-56.
22. Unchenko I.V., Emelyanov A.A. Photonics-based modular multistate digital coherent system, *Russian Technological Journal*, 2022, vol. 10 (4), pp. 27-37. DOI: [10.32362/2500-316X-2022-10-4-27-37](https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-27-37)

Статья поступила в редакцию 26.12.2023

Одобрена после рецензирования 15.01.2024

Принята к публикации 27.02.2024

The article was submitted on 26.12.2023; approved after reviewing on 15.01.2024; accepted for publication on 27.02.2024