

УДК 535.8+621.38+621.391.64+621.3.087.92

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ УДВОЕНИЯ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ СВЕРХКОРОТКИХ СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВЫБОРКИ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ФОТОННЫХ СИСТЕМ

Е.Ю. Злоказов¹, В.А. Небавский^{1*}, Р.С. Стариков¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

*e-mail: VANebavskii@mephi.ru

Поступила в редакцию: 27.08.2023

После доработки: 05.09.2023

Принята к публикации: 05.09.2023

Рассмотрена и экспериментально испытана система удвоения частоты следования коротких оптических импульсов лазера в режиме синхронизации мод, предназначенная для формирования последовательности выборки в аналого-цифровых фотонных системах. Основной идеей умножения частоты следования оптических импульсов является разделение исходной импульсной последовательности, а затем относительная временная задержка разделенных сигналов и их сложение. Разделение и сложение могут осуществляться разветвителями либо демультиплексорами. Представлено аналитическое описание зависимости временной задержки в плечах на сигнал и спектр, полученной в ходе фотодетектирования сформированной последовательности. Величина задержки между импульсами регулируется таким образом, чтобы минимизировать нежелательные спектральные составляющие на кратных частоте повторений лазера частотах в СВЧ-спектре фотодетектированной последовательности; в работе минимизировались члены нечетного порядка. Показано, что на максимальную точность предложенного метода также влияет различие мощности складываемых импульсов. В ходе сопоставления полученных в экспериментах данных с результатами численного моделирования удалось достичь точности рассогласования во времени между каналами не более 100 фемтосекунд, а по мощности – не более 1 %. Апертурная ошибка, вычисленная по результатам измерения фазовых шумов, составила 10.2 фемтосекунды.

Ключевые слова: микроволновая фотоника, радиофотоника, оптическая выборка, апертурная ошибка, джиттер.

DOI: 10.26583/vestnik.2023.264

Современные лазерные источники с низким уровнем фазовых шумов находят применение при построении систем микроволновой фотоники, реализующих оптическую выборку электрических сигналов [1–10 и мн. др.]. В частности, лазеры, работающие в режиме синхронизации мод (ЛСМ), используются в качестве источников импульсных последовательностей выборки, малая апертурная ошибка («джиттер») которых обеспечивает потенциально высокую точность итогового цифрового представления обрабатываемого сигнала. Именно малая апертурная ошибка, в совокупности с широкополосностью и потенциально высокой энергоэффективностью аналого-цифровых систем микроволновой фотоники, определяет фундаментальный интерес к их реализации, несмотря на то, что при существующем уровне техники их точность в большей степени ограничена другими фактора-

ми [5–9, 11]. Импульсы ЛСМ могут использоваться непосредственно в качестве последовательности выборки, другой же вариант состоит в формировании мультиспектральной последовательности выборки, канализируемой с помощью демультиплексоров по длине волны; такие системы обеспечивают также возможности увеличения ширины полосы преобразования, пропорционально числу используемых спектральных каналов, при параллельной обработке в них без повышения частоты выборки. В обоих случаях на практике возникает потребность в повышении исходной частоты следования импульсов ЛСМ, в частности, в настоящее время практический интерес представляет получение последовательностей с частотами 2–10 ГГц. Технически возможны различные варианты повышения частоты следования импульсов ЛСМ, в их основе – деление исходного сигнала с его

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ УДВОЕНИЯ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ СВЕРХКОРОТКИХ
СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВЫБОРКИ
АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ФОТОННЫХ СИСТЕМ

последующими повторением и/или задержкой, при этом, для сформированной последовательности необходимо обеспечить эквидистантность следования импульсов при сохранении низкой апертурной ошибки. Эквидистантность следования достигается путем контроля задержек оптических импульсов после деления исходной последовательности ЛСМ, при этом важны точность реализации и возможность подстройки элементов, выполняющих задержку. Современная мировая практика показывает, что возможно обеспечение эквидистантности с фемтосекундной точностью, более того, в этом случае возможна автоматизация необходимых подстроек системы [12]. К сожалению, по объективным физическим причинам, апертурная ошибка получаемых импульсных последовательностей может только увеличиваться относительно исходной и не может быть скомпенсирована; адекватная оценка такой деградации апертурной ошибки практически важна при построении реальных систем. В данной работе рассматривается практическая система удвоения частоты следования ЛСМ, реализованная на коммерчески доступных пассивных оптоволоконных компонентах.

Основной идеей умножения частоты следования оптических импульсов является разделение исходной импульсной последовательности, а затем относительная временная задержка разделенных сигналов и их сложение. В частности, для удвоения частоты справедливо:

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t + \tau), \quad (1)$$

где $E(t)$ – поле сформированной оптической импульсной последовательности, $E_{1,2}$ – поля импульсных последовательностей ЛСМ после разделения, τ – в идеале, регулируемая временная задержка, которая должна быть, равна половине периода исходной последовательности импульсов ЛСМ.

Если сформированная последовательность детектируется с помощью фотодиода, то сила тока на его выходе описывается выражением

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t + \tau) + 2R(t, \tau) \cos \frac{2\pi c}{\lambda} \tau, \quad (2)$$

где i – сила тока на выходе; $i_{1,2}$ – вклад в ток от каждого из полей $E_{1,2}$; $R(t, \tau)$ – интерферометрический член, усредненный с учетом характеристик фотодетектора, λ – длина волны основной несущей.

Рассмотрим спектральное разложение только суммы токов $i_{1,2}$, что оправдано, если задержка поля выбрана достаточно близко к значению половины периода следования исходной последовательности ЛСМ:

$$W(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (W_{1,k} + W_{2,k} e^{jk\pi}) e^{jk\omega_1 t}, \quad (3)$$

где $W_{1,k}W_{2,k}$ – спектральная мощность на $k\omega_1$ частоте, а ω_1 – частота повторения импульсов.

Очевидно, правильность выбора задержки при заданном соотношении $E_{1,2}$, минимизирует нежелательные спектральные составляющие, на практике же минимальное значение для таких составляющих будет также ограничено качеством используемых оптических элементов. Таким образом, основной метрикой контроля качества юстировки может служить мощность нежелательных спектральных составляющих.

Была собрана схема, представленная на рис. 1,а. В схеме использован ЛСМ С-диапазона с частотой повторения 1.25 ГГц и периодической апертурной ошибкой, измеренной в отстройках от несущей от 1 кГц до 1МГц, равной 8.5 фс. Последовательность импульсов ЛСМ с помощью оптоволоконного разветвителя 50/50 делится в два параллельных канала, в одном из которых использована линия с переменной временной задержкой. Далее обе последовательности объединяются с помощью второго 50/50 разветвителя, на одном из выходов которого результат регистрируется с помощью фотодиода с полосой 40 ГГц и анализируется цифровым осциллографом с истинной аналоговой полосой 33 ГГц и частотой выборки 80 ГГц, либо анализатором источников сигналов, обеспечивающим измерение фазовых шумов. Характерные длины используемых оптоволоконных компонентов – десятки сантиметров. На рис. 1,б представлен результат измерения сигнала макета (осциллограмма).

Величина временной задержки Δt подбирается таким образом, чтобы минимизировать величину нечетных гармоник импульсно-периодического сигнала на осциллографе. На рис. 2,а представлен результат спектрального анализа численной модели импульсно-периодического сигнала на выходе схемы с расстройкой временной задержки в 100 фс и дисбалансом мощностей в каналах 1 %. На рис. 2,б представлен результат спектрального анализа импульсно-периодического сигнала с рис. 1,б.

С помощью анализатора источников сигналов была построена диаграмма фазовых шумов полученной импульсной последовательности. Результат измерений фазовых шумов представ-

лен на рис. 3, он соответствует периодической апертурной ошибке, измеренной в отстройках от несущей от 1 кГц до 1 МГц в 10.2 фс.

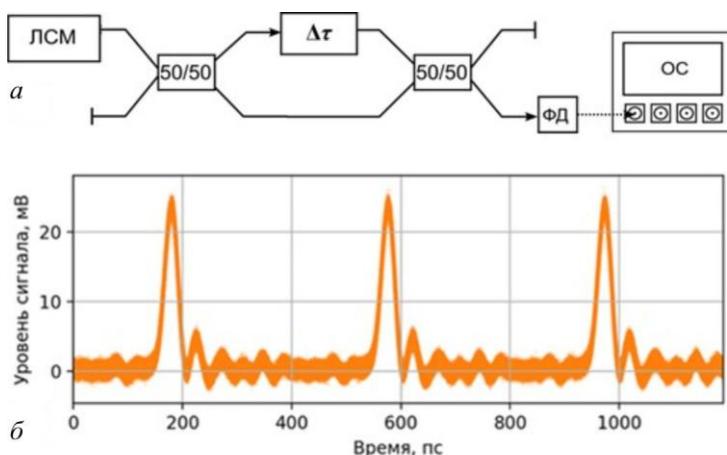


Рис. 1. Измерение сигнала: а) схема пассивного умножителя частоты последовательности импульсов ЛСМ; б) осциллограмма записанного сигнала

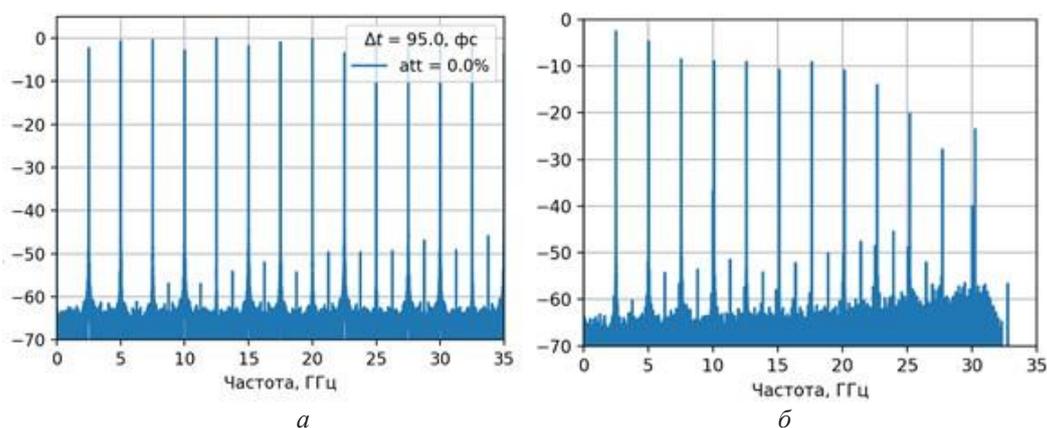


Рис. 2. Результат: а) численного моделирования импульсно-периодической последовательности с рассогласованием каналов по времени на 100 фс и по мощности на 1 %; б) БПФ-анализа последовательности, полученной экспериментально и представленной на осциллограмме рис. 1,б (по вертикальной шкале – мощность, дБ)

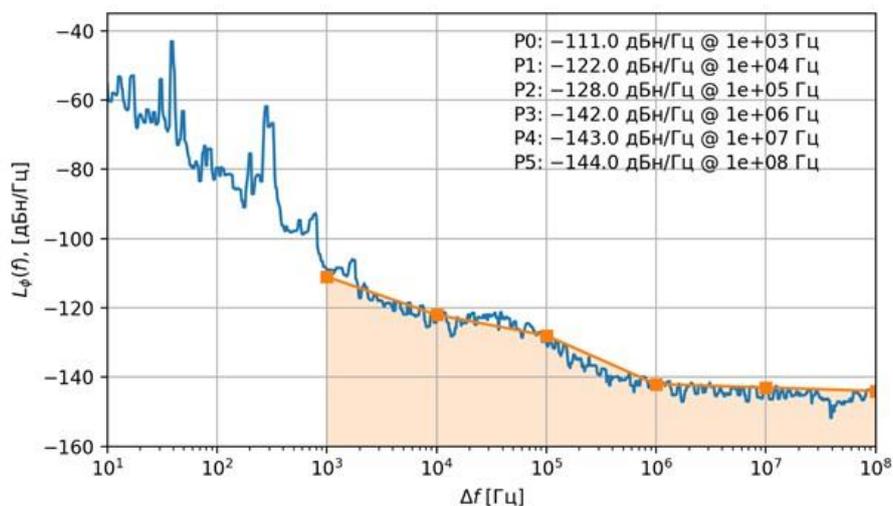


Рис. 3. Результат измерения диаграммы фазовых шумов сформированной импульсной последовательности

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ УДВОЕНИЯ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ СВЕРХКОРОТКИХ
СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВЫБОРКИ
АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ФОТОННЫХ СИСТЕМ

ВЫВОДЫ

Построенная система позволяет получить удвоенную по отношению к исходной частоту следования ультракоротких лазерных импульсов. Схема и метод могут быть развиты для увеличения частоты следования импульсов в 4 и большее четное число раз, при увеличении же в нечетное число раз настройка по компонентам радиочастотного спектра формируемой последовательности представляется более сложной и затруднительной. Схема вносит ожидаемое ухудшение апертурной ошибки – с 8.5 фс у исходной последовательности до 10.2 фс у сформированной. Такое значение, впрочем, в настоящее время представляется приемлемым для ряда практических задач. Вероятно, ожидать лучшей сохранности исходной апертурной ошибки возможно при реализации системы с использованием интегральных элементов с более точным контролем и меньшим абсолютным значением оптического пути.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта 20-37-90119.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valley G.C. Photonic analog-to-digital converters // Opt. Express, 2007. V. 15. No. 5. P. 1995.
2. McKinney J.D., Williams K.J. Sampled analog optical links // IEEE Trans. Microw. Theory Techn., 2009. V. 57. № 8. P. 2093.
3. Стариков П.С. Фотонные АЦП // Успехи совр. радиоэлектроники. 2015. № 2. С. 3.

4. Starikov R.S. Photonic sampled ADC's: state of the art // Proceedings of SPIE, 2016. V. 10176. P. 1017618.
5. Esman D.J., Wiberg A.O.J., Alic, N., Radic S. Highly Linear Broadband Photonic-Assisted Q-Band ADC // J. Light. Technol., 2015. V. 33. P. 2256.
6. Cruz P.E.D., Alves T.M.F. Cartaxo A.V.T. Performance Evaluation of Wavelength Division Multiplexing Photonic Analogue-to-Digital Converters for High-Resolution Radar Systems// Optics and Photonics Journal, 2019. V. 9. P. 219.
7. Xu Y., Li S., Xue X., Xiao X., Zheng X., Zhou B. An interleaved broadband photonic ADC immune to channel mismatches capable for high-speed radar imaging // IEEE Photon. J., 2019. V. 11. № 4. Art. № 5502009.
8. Mehta N. et al. An Optically Sampled ADC in 3D Integrated Silicon-Photonics/65nm CMOS// 2020 IEEE Symposium on VLSI Technology, Honolulu, HI, USA, 2020. P. 1.
9. Дадашев М.С., Земцов Д.С., Злоказов Е.Ю., Небавский В.А., Осипов В.Г., Павлов П.А., Романов А.С., Стариков Р.С., Хафизов И.Ж. Фотонный аналогово-цифровой преобразователь с электронным квантованием и оптической выборкой на скорости до 10 Гвыб/с // Радиотехника и электроника, 2023. Т. 68. № 2. С. 188.
10. Li Z., Wang X., Zhang Y. et al. Photonic sampling analog-to-digital conversion based on time and wavelength interleaved ultra-short optical pulse train generated by using monolithic integrated LNOI intensity and phase modulator // Opt Express, 2022. V. 30(16). P. 29611.
11. Citrin D.S. Photonic Sampling Analog-to-Digital Conversion With Read-In Timing Jitter // IEEE Transactions on Communications, 2022. V. 70. № 1. P. 445.
12. Земцов Д.С., Злоказов Е.Ю., Небавский В.А., Стариков Р.С., Хафизов И.Ж. Формирование мультиспектральной последовательности выборки в аналоговом оптическом тракте: возможность автоматизации с помощью цифровой обратной связи // Измерительная техника, 2023. Т. 6. С. 34.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2023, vol. 12, no. 3, pp. 178–182

**RESEARCH OF A SCHEME FOR DOUBLING THE RECEPTION FREQUENCY
OF ULTRA-SHORT LIGHT PULSES TO FORM A SAMPLING SEQUENCE
OF ANALOG-DIGITAL PHOTONIC SYSTEMS**

E.Yu. Zloказov¹, V.A. Nebavskiy^{1}, R.S. Starikov¹*

¹National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, 115409, Russia

*e-mail: VANebavskii@mephi.ru

Received August 27, 2023; revised September 05, 2023; accepted September 05, 2023

A system for doubling the repetition rate of laser optical pulses in the mode-locked mode, which is designed to form a selection sequence in analog-to-digital photonic connections, is considered and experimentally tested. The

basic idea of pulse repetition rate multiplication is to isolate the original pulse sequence and then the corresponding time delay to separate the pulse signals and their effects. The division and addition can be carried out both by branching and by gratings or by demultiplexers. Shown analytical description depends on the time delay in the signal arms and the spectrum obtained in the process of photodetection of the generated sequence. The amount of delay between pulses is adjusted in such a way as to minimize unwanted spectral components at multiple repetition rates of laser frequencies in the microwave spectra of the photodetected sequence, in which odd-order terms are minimized. It is shown that the effect of changing pulses also affects the caution of the proposed method. To considering the data in experiments with the results of the computational calculation, it was possible to achieve an accuracy of mismatch in time between pulses of no more than 100 femtoseconds, and a power difference of no more than 1 %. The jitter was calculated using phase noise measurements is 10.2 femtoseconds.

Keywords: microwave photonics, radio photonics, optical sampling, aperture error, jitter.

REFERENCES

1. *Valley G.C.* Photonic analog-to-digital converters. *Opt. Express*, 2007. Vol. 15. No. 5. P. 1995.
2. *McKinney J.D., Williams K.J.* Sampled analog optical links. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 2009. Vol. 57. No. 8. P. 2093.
3. *Starikov R.S.* Fotonnyye ACP. [Photonic ADCs]. *Uspekhisovr. Radioelektroniki*, 2015. No. 2. P. 3 [in Russian].
4. *Starikov R.S.* Photonic sampled ADC's: state of the art. *Proceedings of SPIE*, 2016. Vol. 10176. P. 1017618.
5. *Esman D.J., Wiberg A.O.J., Alic N., Radic S.* Highly Linear Broadband Photonic-Assisted Q-Band ADC. *J. Light. Technol.*, 2015. Vol. 33. P. 2256.
6. *Cruz P.E.D., Alves T.M.F., Cartaxo A.V.T.* Performance Evaluation of Wavelength Division Multiplexing Photonic Analogue-to-Digital Converters for High-Resolution Radar Systems. *Optics and Photonics Journal*, 2019. Vol. 9. P. 219.
7. *Xu Y., Li S., Xue X., Xiao X., Zheng X., Zhou B.* An interleaved broadband photonic ADC immune to channel mismatches capable for high-speed radar imaging. *IEEE Photon. J.*, 2019. Vol. 11. No. 4. Art. no. 5502009.
8. *Mehta N. et al.* An Optically Sampled ADC in 3D Integrated Silicon-Photonics/65nm CMOS. 2020 IEEE Symposium on VLSI Technology, Honolulu, HI, USA, 2020. P. 1.
9. *Dadashev M.S., Zemcov D.S., Zlokazov E.Yu., Nebavskij V.A., Osipov V.G., Pavlov P.A., Romanov A.S., Starikov R.S., Hafizov I.ZH.* Fotonnyj analogovo-cifrovoj preobrazovatel' s elektronnyim kvantovaniem I opticheskoj vyborkoj na skorosti do 10 Gvyb/s. [Photonic A/D converter with electronic quantization and optical sampling at speeds up to 10 GS/s]. *Radio-tehnikaielektronika*, 2023. Vol. 68. No. 2. P. 188 [in Russian].
10. *Li Z., Wang X., Zhang Y. et al.* Photonic sampling analog-to-digital conversion based on time and wavelength interleaved ultra-short optical pulse train generated by using monolithic integrated LNOI intensity and phase modulator. *Opt Express*. 2022 Aug 1. Vol. 30(16). P. 29611.
11. *Citrin D.S.* Photonic Sampling Analog-to-Digital Conversion With Read-In Timing Jitter// *IEEE Transactions on Communications*, 2022. Vol. 70. No. 1. Pp. 445.
12. *Zemcov D.S., Zlokazov E.Yu., Nebavskij V.A., Starikov R.S., Hafizov I.Zh.* Formirovanie mul'tispektral'noj posledovatel'nosti vyborki v analogovom opticheskom trakte: vozmozhnost' avtomatizacii s pomoshch'yu cifrovoj obratnoj svyazi [Formation of a multispectral sampling sequence in an analog optical path: possibility of automation using digital feedback]. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2023. Vol. 6. Pp. 34 [in Russian].