

УДК 681.785

Повышение пиковой мощности импульсного источника лазерного излучения с применением кольцевой волоконной линии задержки

В.А. Алексеев, М.Р. Зарипов, А.С. Перминов, Е.А. Ситникова, В.П. Усольцев, С.И. Юран

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашикова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

Поступила 19.04.2019

Принята к печати 30.05.2019

В настоящее время при создании автономных лазерных систем возникают требования в части повышения выходной мощности используемых в их составе лазерных источников при одновременном снижении энергопотребления системы. Авторами рассмотрена возможность увеличения выходной пиковой мощности импульсных лазерных источников за счет применения метода синхронного некогерентного суммирования импульсов в кольцевой волоконно-оптической линии задержки. Целью настоящей работы являлась оценка энергетической эффективности лазерных устройств, построенных на основе данного метода.

Рассмотрен общий способ построения импульсного лазерного источника с применением кольцевой волоконной линии задержки, представлены его структурная схема и общий принцип действия подобных данному устройству систем. Приведены два варианта исполнения лазерных систем, построенных на основе описываемого в работе метода суммирования импульсов: с оптическим сумматором и оптическим коммутатором; со сваркой волокон взамен сумматора и оптическим коммутатором. Получены графики энергетической эффективности систем первого и второго вариантов исполнений в зависимости от числа обходов импульса в кольцевой задержке.

В результате анализа работы рассмотренных устройств показано, что они позволяют увеличить пиковую мощность лазерного импульса без повышения энергии питания, при этом большей эффективностью обладает система с применением сваренных волокон взамен оптического сумматора.

Ключевые слова: лазерный источник излучения, пиковая мощность, кольцевая волоконная линия задержки, энергетическая эффективность, оптические потери.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159

Адрес для переписки:

М.Р. Зарипов
Ижевский государственный технический университет имени
М.Т. Калашикова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: zaripov.istu@gmail.com

Address for correspondence:

M.R. Zaripov
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: zaripov.istu@gmail.com

Для цитирования:

В.А. Алексеев, М.Р. Зарипов, А.С. Перминов, Е.А. Ситникова,
В.П. Усольцев, С.И. Юран.
Повышение пиковой мощности импульсного источника лазерного
излучения с применением кольцевой волоконной линии задержки.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 2. – С. 151–159.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159

For citation:

V.A. Alekseev, M.R. Zaripov, A.S. Perminov, E.A. Sitnikova,
V.P. Usol'tsev, S.I. Yuran.
[Increasing of Pulsed Laser Source Peak Power by Use of Ring Fiber-
Optic Delay Line].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 2, pp. 151–159 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159

Increasing of Pulsed Laser Source Peak Power by Use of Ring Fiber-Optic Delay Line

V.A. Alekseev, M.R. Zaripov, A.S. Perminov, E.A. Sitnikova, V.P. Usol'tsev, S.I. Yuran

Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

Received 19.04.2019

Accepted for publication 30.05.2019

Abstract

At the present time, developing of autonomous laser systems requires increasing of the output power of the laser sources used in composition of those systems and at the same time reducing of the energy usage in the system. The possibility of increasing output peak power of pulsed laser sources by using the method of synchronous non-coherent beam combining in ring fiber-optic delay line is considered by authors. Objective of this work was estimating energy effectiveness of laser systems, which based on this method.

General constructing method of the laser pulsed laser source with ring fiber delay line is considered, its block diagram and the general operating principle of similar systems are presented. Two versions of laser systems based on the described method of beam combining are presented: using an optical combiner and an optical switch; using fiber welding instead of a combiner and an optical switch. The graphical dependence of the energy effectiveness on the number of circulations in ring fiber-optic delay line is obtained for both versions of laser systems.

As a result of the analysis of the considered devices operation, it was shown that considered systems allow to obtain increasing the peak power of a laser pulse without increasing the power supply, also the system, that use welded fibers instead of the optical combiner, has greater efficiency than system with optical combiner.

Keywords: laser source, peak power, ring fiber-optic delay line, energy effectiveness, optical losses.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159

Адрес для переписки:

М.Р. Зарипов
Ижевский государственный технический университет имени
М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: zaripov.istu@gmail.com

Address for correspondence:

M.R. Zaripov
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: zaripov.istu@gmail.com

Для цитирования:

В.А. Алексеев, М.Р. Зарипов, А.С. Перминов, Е.А. Ситникова,
В.П. Усольцев, С.И. Юран.
Повышение пиковой мощности импульсного источника лазерного
излучения с применением кольцевой волоконной линии задержки.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 2. – С. 151–159.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159

For citation:

V.A. Alekseev, M.R. Zaripov, A.S. Perminov, E.A. Sitnikova,
V.P. Usol'tsev, S.I. Yuran.
[Increasing of Pulsed Laser Source Peak Power by Use of Ring Fiber-
Optic Delay Line].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 2, pp. 151–159 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159

Введение

При разработке и создании автономных лазерных систем, лазерных систем связи, лазерных устройств глубоководного погружения, а также специальных мобильных измерительных систем, лидаров, дальномеров и локационных систем возникает проблема повышения выходной мощности и выходной энергии импульса лазерного излучения без увеличения энергии внешнего источника электропитания или включения в систему дополнительных источников лазерного излучения.

Задача повышения выходной мощности наиболее актуальна для систем, построенных на основе импульсных лазерных источников, амплитуда импульса излучения которых определяет основные характеристики системы:

- степень воздействия лазерного излучения на исследуемый объект;
- дальность распространения лазерного излучения в различных средах.

Известно, что в настоящее время увеличения амплитуды импульсов лазерного излучения добиваются за счет применения различных методов компрессии лазерных импульсов [1, 2], оптических усилителей [3, 4], а также ряда способов некогерентного [5–8] и когерентного [5, 9–11] суммирования лазерных пучков.

Авторы настоящей работы предлагают рассмотреть собственный разработанный метод повышения пиковой мощности лазерных импульсов за счет синхронного суммирования с помощью средства кольцевой волоконной задержки.

Целью работы являлась оценка энергетической эффективности систем, построенных на основе данного метода.

Метод некогерентного синхронного суммирования лазерных импульсов на кольцевой волоконной линии задержки

Для решения поставленной задачи ранее предлагался метод некогерентного суммирования лазерных импульсов [8], который заключался в синхронном суммировании энергии. При этом сложение энергий импульсов лазерного излучения происходило за счет их последовательного направления с помощью N -канального оптического коммутатора через N элементов волоконно-оптической задержки разной длины

в оптический сумматор. Такой способ обеспечивал формирование импульса, пиковая мощность которого равна сумме пиковых мощностей импульсов лазерного излучения за исключением потерь в компонентах системы суммирования.

Устройство, построенное на основе данного способа, позволило существенно повысить пиковую мощность излучения одного импульсного лазера без увеличения его энергии питания, сжатия импульсов излучения по длительности или применения дополнительных источников лазерного излучения. Тем не менее, возрастание числа линий задержки вместе с увеличением их длины для повышения выходной суммарной пиковой мощности излучения приводило к ухудшению массогабаритных характеристик и снижению надежности работы подобного устройства.

В настоящей работе рассматривается впервые описанный в [12] способ повышения пиковой мощности источника импульсного лазерного излучения на основе кольцевой волоконно-оптической линии задержки. Действие устройства заключается в последовательном синхронном наложении друг на друга импульсов лазерного излучения, поступающих на вход кольцевой линии задержки. При этом должно обеспечиваться наложение начала импульса, поступившего на вход средства кольцевой волоконной задержки, на начало импульса, уже совершившего обход в нем. С каждым обходом пучок будет накапливать энергию лазерного излучения за счет суммирования. На рисунке 1 приведены несколько схем источника импульсного лазерного излучения с кольцевой волоконной задержкой.

Упрощенная схема (рисунк 1а) необходима для пояснения следующего далее описания принципа действия рассматриваемого устройства. С задающего генератора 1 на вход импульсного лазера 2 поступает импульсный сигнал. Этот сигнал управляет работой лазера. На средство кольцевой оптической задержки 3 через заданный период следования импульсов T , который соответствует времени обхода импульсом кольцевой линии задержки, поступают импульсы оптического лазерного излучения. Импульс проходит по оптоволоконному кольцу до момента, когда в линию задержки поступит новый импульс лазерного излучения. Цикл продолжается до определенного количества N_R обходов, зависящего от допустимого затухания в линии задержки. На управляющий вход коммутирующего устройства 4

поступают электрические импульсы от счетчика импульсов 5 с частотой в N_R раз меньше частоты ($1/T$) импульсов, которая вырабатывается генератором. В момент поступления электрического импульса со счетчика на вход коммутирующего устройства происходит переключение канала циркуляции оптического излучения по средству кольцевой оптической задержки на выход коммутирующего устройства, где формируется импульс оптического излучения. Пиковая мощность сформированного импульса состоит из мощностей N_R импульсов лазерного излучения, поступивших в средство кольцевой оптической задержки за период $N_R \cdot T$, с учетом оптических потерь.

В работе [12] источник импульсного лазерного излучения, представленный в виде схемы на рисунке 1а, позволял практически в 17 раз повысить пиковую мощность импульсов лазера при применении одной кольцевой волоконно-оптической линии задержки, при этом в системе учитывались лишь оптические потери в волокнах. По сравнению с ним, устройство, описанное в [8], обеспечивает такое же увеличение пиковой мощности при использовании в своей системе двадцати волоконно-оптических линий задержки разной длины.

Следовательно, устройства, реализованные на основе схемы, приведенной на рисунке 1а, позволяют повысить выходную пиковую мощность излучения без увеличения энергии питания. Вместе с тем снижение массогабаритных параметров подобных источников лазерного излучения и повышение их надежности в сравнении с устройствами, реализующими схему работы, представленную в [8], обеспечивается за счет уменьшения числа линий задержек до одной. Причем для формирования в данной системе на выходе импульсов высокой пиковой мощности необходимо компактное устройство электропитания и малогабаритный источник лазерного излучения, что представляет особенный интерес при разработке автономных лазерных систем.

Практическая реализация предложенной схемы возможна с помощью представления волоконной кольцевой задержки в виде совокупности волоконно-оптического сумматора с двумя оптическими входами и одним оптическим выходом (далее – сумматора 2×1), волоконно-оптического коммутатора (переключателя) с одним оптическим входом и двумя оптическими выходами (далее – коммутатора 1×2), выполняющего также

функции коммутирующего устройства и отрезка волокна (рисунок 1б). Длина этого отрезка фактически соответствует длине рассмотренного ранее на рисунке 1а кольцевого участка.

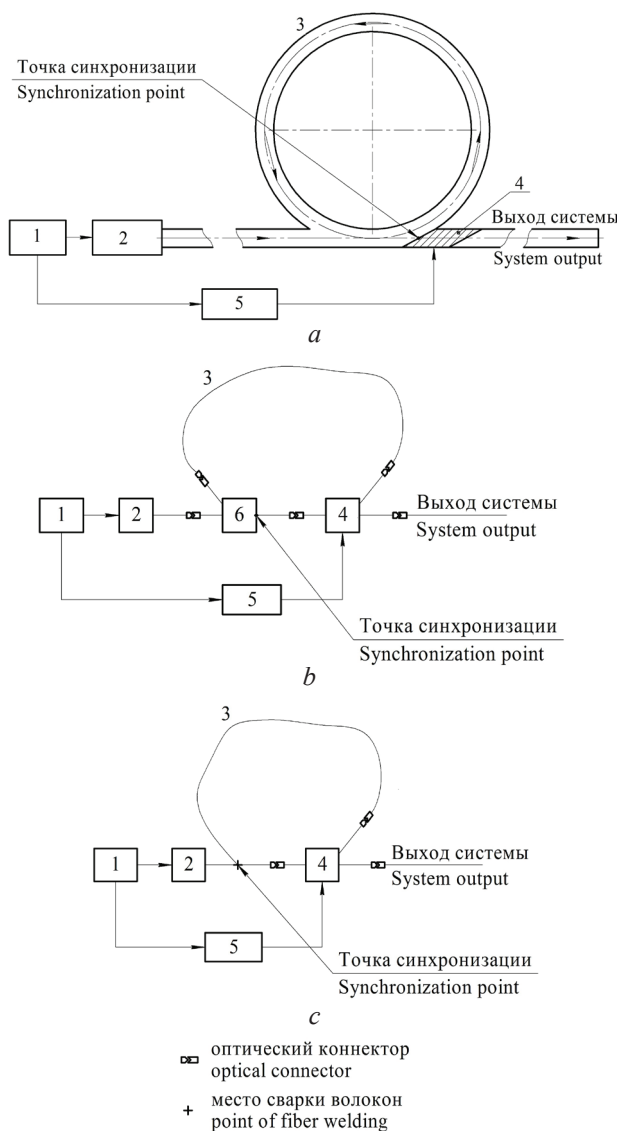


Рисунок 1 – Упрощенная (а), с применением оптического сумматора и оптического коммутатора (б) и с применением оптического коммутатора и сваренных волокон (с) схема источника импульсного лазерного излучения на кольцевой волоконной задержке: 1 – задающий генератор; 2 – импульсный лазер; 3 – средство кольцевой волоконно-оптической задержки (отрезок волокна); 4 – коммутирующее устройство; 5 – счетчик импульсов; 6 – оптический сумматор

Figure 1 – Simple (a), with optical combiner and optical switch (b) and with optical switch and welded fibers (c) scheme of pulsed laser source with ring fiber-optic delay device (fiber line); 4 – switching device; 5 – pulse counter; 6 – optical combiner

Как видно из рисунка 1*b*, волоконный выход импульсного лазера 2 при помощи оптического коннектора соединен с первым входом сумматора 6, через который излучение поступает в систему кольцевой оптической задержки. Выход сумматора 6 соединен с входом коммутатора 4, при этом лазерное излучение через первый выход коммутатора вводится в отрезок волокна задержки 3, подключенный ко второму входу сумматора 6. Таким образом, обеспечивается циркуляция вводимого в систему кольцевой задержки излучения и его суммирование в точке синхронизации с каждым следующим лазерным импульсом, поступающим через первый вход сумматора. Процесс накапливания излучения идет до тех пор, пока суммарный импульс в «кольце» не будет выведен через второй выход коммутатора при его переключении по управляющему сигналу со счетчика 5, соединенного с задающим генератором 1, который управляет работой лазера.

Применение оптического сумматора, имеющего собственные внутренние потери и содержащего в своем составе два оптических коннектора, приводит к снижению эффективности системы. Поэтому в качестве еще одного варианта исполнения устройства предлагается рассмотреть схему, в которой кольцевая линия задержки сформирована за счет сваривания концов трех волокон: волоконного выхода лазера 2, волоконного элемента кольцевой линии задержки 3 и волоконного входа оптического коммутатора 4, используемого в качестве коммутирующего устройства (рисунок 1*c*). При этом точка синхронизации, в которой происходит суммирование импульса, совершившего обход, и импульса, вводимого в линию задержки, совпадает с местом сварки волокон.

Создание рассматриваемых систем возможно при использовании в качестве оптического коммутатора серийно изготавливаемых *Agiltron Inc.* высокоскоростных волоконно-оптических переключателей серии *NanoSpeedTM 1×2*, при этом в роли оптического сумматора могут применяться волоконно-оптические сумматоры типа *PSC*, обеспечивающие объединение излучения от нескольких волоконных световодов в один общий на выходе.

Следует учитывать, что увеличение числа обходов в волоконной кольцевой задержке, необходимых для накопления и суммирования в ней импульсов, приведет к возрастанию потерь

излучения в системе в целом. Таким образом, максимальное число обходов в кольцевой задержке и эффективность предлагаемых вариантов импульсных лазерных источников будут ограничены величиной допустимых потерь.

Данная работа посвящена оценке энергетической эффективности предлагаемой системы с некогерентным синхронным суммированием лазерных импульсов на кольцевой волоконной линии задержки.

Вычислительный эксперимент

Для устройств на рисунках 1*b* и 1*c* важно определить максимальное число обходов в кольцевой линии задержки, а также эффективность данных систем в целом.

При этом учитывались следующие типы потерь энергии излучения:

- потери на оптических коннекторах, используемых для подключения к волоконным разъемам сумматора (в схеме на рисунке 1*b*) и коммутатора;
- потери при распространении излучения в волоконном световоде, образующем кольцевую линию задержки;
- внутренние потери в оптическом сумматоре (в схеме на рисунке 1*b*);
- потери в месте сварки волокон (в схеме на рисунке 1*c*);
- внутренние потери в оптическом коммутаторе.

Каждый исходный импульс лазерного излучения, введенный в систему на рисунке 1*b*, совершая обход в кольцевой задержке к точке синхронизации, претерпевает последовательно потери в первом коннекторе при вводе в оптический сумматор от выхода лазера, внутренние потери в оптическом сумматоре, потери во втором коннекторе от выхода из оптического сумматора до входа в оптический коммутатор, внутренние потери в оптическом коммутаторе, потери в третьем коннекторе от выхода из оптического коммутатора при вводе в волокно кольцевой задержки, потери в оптическом волокне кольцевой линии задержки, в четвертом коннекторе при вводе излучения в оптический сумматор из волокна кольцевой задержки и внутренние потери в оптическом сумматоре.

При этом суммарный импульс излучения при выводе из системы после N_R обходов в кольцевой задержке, распространяясь

от точки синхронизации до выхода, претерпевает последовательно потери во втором коннекторе от выхода из оптического сумматора до входа в оптический коммутатор, внутренние потери в оптическом коммутаторе и потери в пятом коннекторе на выходе из оптического коммутатора до вывода импульса из системы. В таком случае пиковую мощность P_N суммарного импульса на выходе из системы можно определить по следующей формуле:

$$P_N = 10^{-0,1(3A_C + A_{OC} + A_{OS})} \cdot \sum_{i=0}^{N_R} 10^{-0,1i(3A_C + A_{OC} + A_{OS} + A_F \cdot L_R)},$$

где A_C – потери на коннекторе, дБ; A_{OC} – внутренние потери в оптическом коммутаторе, дБ; A_{OS} – внутренние потери в оптическом сумматоре, дБ; A_F – удельные потери выбранного волоконного световода, дБ/м; L_R – длина отрезка оптического волокна кольцевой линии задержки, м.

Каждый исходный импульс лазерного излучения, введенный в систему на рисунке 1с, совершая обход в кольцевой задержке к точке синхронизации, претерпевает последовательно потери в месте сварки при вводе в систему от выхода лазера, потери в первом коннекторе от места сварки до входа в оптический коммутатор, внутренние потери в оптическом коммутаторе, потери во втором коннекторе от выхода из оптического коммутатора при вводе в волоконно кольцевой задержке, потери в оптическом волокне кольцевой линии задержки и потери в месте сварки.

Причем суммарный импульс излучения при выводе из системы после N_R обходов в кольцевой задержке, распространяясь от точки синхронизации до выхода, претерпевает последовательно потери в первом коннекторе от места сварки до входа в оптический коммутатор, внутренние потери в оптическом коммутаторе и потери в третьем коннекторе на выходе из оптического коммутатора до вывода импульса из системы. Тогда пиковая мощность P_N суммарного импульса на выходе из системы может быть вычислена с применением следующего равенства:

$$P_N = 10^{-0,1(2A_C + A_{OC} + A_W)} \cdot \sum_{i=0}^{N_R} 10^{-0,1i(2A_C + A_{OC} + A_W + A_F \cdot L_R)},$$

где A_W – потери в месте сварки волокон, дБ.

Главной целью данной работы является определение зависимости от числа обходов в кольцевой задержке коэффициента энергетической эффективности системы $\eta = P_N/P_0$, показывающего, во сколько раз возрастет выходная пиковая мощность суммарного импульса P_N по сравнению с пиковой мощностью исходного импульса лазера P_0 .

При выполнении расчетов были приняты следующие допущения:

- длина волокна кольцевой задержки, принималась равной 2 м, что было достаточно для исключения потерь на макроизгибах;
- не рассматривались потери на микроизгибах волоконных световодов;
- не учитывалась дисперсия волоконных световодов в системе, которая приводит к дополнительному искажению формы лазерных импульсов, так как предполагалось применение волокон со смещенной нулевой дисперсией в область 1550 нм (волокна типа *DSF*) или волокон с многослойной оболочкой, обеспечивающих близкую к нулю величину суммарной дисперсии (волокна типа *NZDSF*) [13];
- не учитывались потери на других отрезках волокна в системе, так как длина отрезков волоконных выходов и входов сумматора 2×1 и коммутатора 1×2 принималась малой по сравнению с длиной волокна кольцевой задержки.

В вычислительном эксперименте в качестве источника исходных импульсов применялся полупроводниковый лазер *QDFBLD-1550-5*, генерирующий излучение на длине волны $\lambda = 1550$ нм с предельной частотой следования импульсов в 2,5 ГГц.

При вычислении эффективности η значения потерь в коннекторах согласно [13] были приняты равными 0,15 дБ, что соответствует оптическим коннекторам типа *APC* и *UPC*, внутренние потери в коммутаторе 1×2 и сумматоре 2×1 – 0,6 дБ и 0,7 дБ соответственно; считалось также, что ослабление излучения в месте сварки волокон равно 0,02 дБ [13].

В обоих вариантах системы предлагалось использовать кварцевые волоконные световоды, величина удельных потерь у которых на длине волны $\lambda = 1550$ нм составила 0,2 дБ/км [13].

Результаты и их обсуждение

С учетом заданных выше параметров был получен график зависимости коэффициента эффективности $\eta(N_R)$ от числа обходов лазерного импульса в кольцевой линии задержки для системы с применением оптического сумматора и оптического коммутатора (рисунок 2).

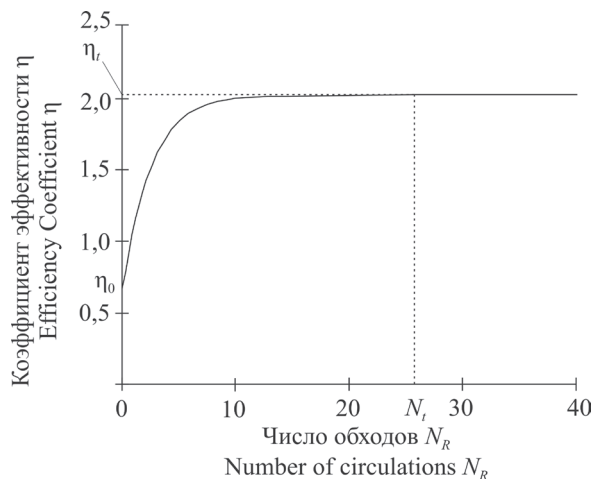


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента эффективности $\eta(N_R)$ от числа обходов лазерного импульса в кольцевой линии задержки для системы с оптическим сумматором и оптическим коммутатором

Figure 2 – Dependence of the effectiveness coefficient $\eta(N_R)$ on the number of laser pulse circulations in ring delay line for the system with optical combiner and optical switch

На рисунке 2 видно, что энергетическая эффективность системы η с увеличением числа циркуляций импульса в кольцевой задержке N_R от линейной зависимости с быстрым нарастанием переходит к «насыщению», при котором значение эффективности η остается неизменным при возрастании числа N_R .

Предельное значение коэффициента эффективности составило $\eta_t = 2,015$. Этому значению соответствует число обходов в задержке $N_t = 26$, при превышении которого не происходит дальнейшего возрастания эффективности рассматриваемой системы. При этом нулевое значение коэффициента эффективности, при котором излучение проходит через систему без циркуляции в системе задержки, получилось равным $\eta_0 = 0,668$.

На рисунке 3 приведен график зависимости коэффициента эффективности $\eta(N_R)$ от числа обходов лазерного импульса в кольцевой линии задержки для системы с применением сваренных волокон и оптического коммутатора.

Очевидно, что энергетическая эффективность η системы, в которой взамен сумматора применялись три сваренных волокна, с увеличением числа обходов N_R также переходит от линейного возрастания к постоянной зависимости с неизменным значением при возрастании числа N_R .

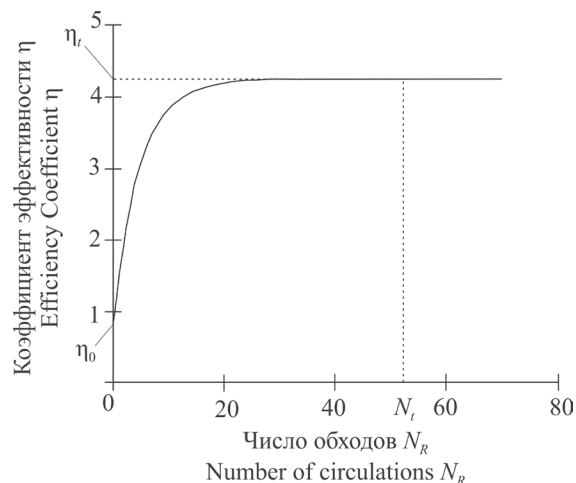


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента эффективности $\eta(N_R)$ от числа обходов лазерного импульса в кольцевой линии задержки для системы со сваркой волокон и оптическим коммутатором

Figure 3 – Dependence of the effectiveness coefficient $\eta(N_R)$ on the number of laser pulse circulations in ring delay line for the system with welded fibers and optical switch

Предельное значение коэффициента эффективности составило $\eta_t = 4,237$. Этому значению соответствует число циркуляций в кольцевой задержке $N_t = 56$, при превышении которого не происходит дальнейшего возрастания эффективности рассматриваемой системы. Нулевое значение коэффициента эффективности при этом $\eta_0 = 0,809$.

Заключение

Показано основное преимущество рассматриваемых систем с кольцевой линией задержки по сравнению с системами с множеством волоконных линий задержки, которое заключается в значительном снижении массы и габаритных размеров системы, ее упрощении и повышении ее надежности за счет исключения множества волоконных линий задержки. В то же время системы с кольцевой задержкой выполняют свою основную функцию, которая сводится к увеличению пиковой мощности введенного от внешнего лазерного источника импульса излучения.

В результате проведенного в работе вычислительного эксперимента получены графики зависимости коэффициента энергетической эффективности $\eta(N_R)$ для двух вариантов исполнения, а также определены для обоих случаев предельные значения коэффициента η и числа оборотов N_R .

Исходя из полученных результатов, можно однозначно утверждать, что дальнейшее развитие систем с кольцевой волоконной задержкой должно пойти по пути исключения из схемы оптического сумматора и применения волоконно-оптических элементов (оптических коннекторов и коммутаторов) с меньшим значением внутренних потерь.

Список использованных источников

1. Власов, С.Н. Уширение спектра и сжатие мощных лазерных импульсов в квазипериодических системах с кубической нелинейностью / С.Н. Власов, Е.В. Копосова, В.Е. Яшин // *Квантовая электроника*. 2012. – Т. 42, № 11. – С. 989–995.

DOI: 10.1070/QE2012v042n11ABEH014979

2. Mourou, G.A. Exawatt-Zettawatt pulse generation and applications / G.A. Mourou [et al.] // *Optics Communications*. – 2012. – Vol. 285. – P. 720–724.

DOI: 10.1016/j.optcom.2011.10.089

3. Обронов, И.В. Твердотельный усилитель на основе кристалла Yb:YAG с одномодовой лазерной накачкой на длине волны 920 нм / И.В. Обронов, А.С. Демкин, Д.В. Мясников // *Квантовая электроника*. – 2018. – Т. 48, № 3. – С. 212–214.

DOI: 10.1070/QEL16605

4. Фирстов, С.В. Висмутовый волоконно-оптический усилитель для спектральной области 1600–1800 нм / С.В. Фирстов [и др.] // *Квантовая электроника*. – 2015. – Т. 45, № 12. – С. 1083–1085.

DOI: 10.1070/QE2015v045n12ABEH015962

5. Motes, A. Laser beam combining / A. Motes // Rio-Rancho: AM Photonics. – 2015. – 132 p.

6. Сумматор оптического излучения. Н.И. Бушмелев, В.Н. Кривошеин, С.Л. Погорельский, А.В. Сбродов, В.Ф. Лазукин, А.Г. Шипунов. – Патент России № 2182346. – 2002.

7. Lei, C. Incoherent beam combining of fiber lasers by an all-fiber 7×1 signal combiner at a power level of 14 kW / C. Lei [et al.] // *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26, no. 7. – P. 10421–10427. DOI: 10.1364/OE.26.010421

8. Алексеев, В.А. Повышение пиковой мощности источника импульсного лазерного излучения с применением оптических линий задержки / В.А. Алексеев, А.С. Перминов, С.И. Юран // *Оптический журнал*. – 2018. – Т. 85, № 12. – С. 8–14.

DOI: 10.17586/1023-5086-2018-85-12-08-14

9. Brignon, A. Coherent laser beam combining / A. Brignon // Weinheim: Wiley-VCH. – 2013. – 509 p.

10. Yang, Y. Multi-aperture all-fiber active coherent beam combining for free-space optical communication receivers / Y. Yang [et al.] // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, № 22. – P. 27519–27532.

DOI: 10.1364/OE.25.027519

11. Трикушев, А.И. Фазировка двух усилительных каналов при когерентном сложении лазерных пучков суммарной мощностью 60 Вт / А.И. Трикушев, Ю.Н. Пырков, В.Б. Цветков // *Квантовая электроника*. – 2017. – Т. 47, № 11. – С. 1045–1048.

DOI: 10.1070/QEL16433

12. Алексеев, В.А. Источник импульсного лазерного излучения на кольцевой волоконной задержке / В.А. Алексеев, М.Р. Зарипов, Е.А. Ситникова // *Прикладная оптика–2018: сборник трудов XIII Международной конференции (Санкт-Петербург 19–21 декабря 2018)*. – Том 2. – Секция 5. Лазерная техника. – С. 27–29.

13. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / Под ред. С.А. Дмитриева и Н.Н. Слепова. – М.: Техносфера, 2010. – 608 с.

References

1. Vlasov Sergei N., Kuposova E.V., Yashin V.E. Spectral broadening and compression of high-intensity laser pulses in quasi-periodic systems with Kerr nonlinearity. *Quantum Electronics*, 2012, vol. 42, no. 11, pp. 989–995. DOI: 10.1070/QE2012v042n11ABEH014979

2. Mourou G.A., Fisch N.J., Malkin V.M., Toroker Z., Khazanov E.A., Sergeev A.M., Tajima T., Le Garrec. Exawatt-Zettawatt pulse generation and applications. *Optics Communications*, 2012, vol. 285, pp. 720–724. DOI: 10.1016/j.optcom.2011.10.089

3. Obroнов I.V., Demkin A.S., Myasnikov D.V. Solid-state Yb: YAG amplifier pumped by a single-mode laser at 920 nm. *Quantum Electronics*, 2018, vol. 48, no. 3, pp. 212–214. DOI: 10.1070/QEL16605

4. Firsov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Khopin V.F., Mel'kumov M.A., Gurjanov A.N., Dianov E.M. Bismuth-doped fibre amplifier operating between 1600 and 1800 nm. *Quantum Electronics*, 2015, vol. 45, no. 12, pp. 1083–1085.

DOI: 10.1070/QE2015v045n12ABEH015962

5. Motes A. *Laser beam combining*. Rio-Rancho: AM Photonics, 2015, 132 p.

6. Bushmelev N.I., Krivoshein V.N., Pogorel'ski S.L., Sbrodov A.V., Lazukin V.F., Shipunov A.G. *Summator opticheskogo izluchenia* [Combiner of optical radiation]. Patent RU 2182346, 2002.

7. Lei C., Gu Y., Chen Z., Wang Z., Zhou P., Ma Y., Xiao H., Leng J., Wang X., Hou J., Xu X., Chen J., Liu Z. Incoherent beam combining of fiber lasers by an all-fiber 7×1 signal combiner at a power level of 14 kW. *Optics Express*, 2018, vol. 26, iss. 7, pp. 10421–10427.

DOI: 10.1364/OE.26.010421

8. Alekseev V.A., Perminov A.S., Yuran S.I. Increasing the peak power of a pulsed laser source using optical delay lines. *J. Opt. Technol.*, 2018, vol. 85, iss. 12, pp. 746–751. DOI: 10.1364/JOT.85.000746

9. Brignon A. *Coherent laser beam combining*. Weinheim: Wiley-VCH, 2013, 509 p.

10. Yang Y., Geng C., Li F., Huang G., Li X. Multi-aperture all-fiber active coherent beam combining for free-space optical communication receivers. *Optics Express*, 2017, vol. 25, iss. 22, pp. 27519–27532.

DOI: 10.1364/OE.25.027519

11. Trikshev A.I., Pyrkov Yu.N., Tsvetkova V.B. Phasing of two amplifier channels for the coherent combining of laser beams with a total power of 60 W. *Quantum Electronics*, 2017, vol. 47, no. 11, pp. 1045–1048.

DOI: 10.1070/QEL16433

12. Alekseev V.A., Zaripov M.R., Sitnikova E.A. [Pulsed laser source based on ring fiber-optic delay]. *Prikladnaya optika-2018: sbornik trudov XIII Mezh-dunarodnoy konferencii* [Applied optics-2018: XIII International conference proceedings], vol. 2, section 5. *Lazernaya tehnika* [Laser technic], pp. 27–29 (in Russian).

13. *Volokonno-opticheskaya tehnika: sovremen-noye sostoyanie i perspektivi* [Fiber-optic technic: present condition and perspectives]. Edited by S.A. Dmitriev and N.N. Slepov. Moscow, Technosfera Publ., 2010, 608 p. (in Russian).