

Анализ эффективности генерирования и преобразования оптических ФИМД-сигналов на базе классического RoF-сегмента, основанного на применении двух лазеров

И. Л. Виноградова¹, Е. Ю. Головина²

¹ ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

² Институт нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО «УГНТУ» в г. Салавате

Аннотация: В статье предлагается метод генерации и преобразования оптических ФИМД-сигналов на базе классического RoF-сегмента, основанного на применении двух лазеров. Произведена оценка параметров схемы классического RoF-сегмента, основанного на применении двух независимых лазерных источников. Предложен подход к моделированию параметров распространяющегося излучения. Установлено, что в случае отсутствия chirпирования сигналов данная схема может быть применена для задач получения радиочастоты в пределах до нескольких ГГц. С ростом частотного удаления оптических частот этих лазеров существенно растет уровень нестабильности, сводя на нет достоинства оптического генерирования радиочастот из-за возрастания фазового шума. Тем не менее определен диапазон параметров, при котором рассматриваемая схема обеспечивает относительно стабилизированный режим работы, а значит, может найти применение в задачах промышленного интернета (IIoT), внедрение которого на сегодняшний день происходит во многих компаниях.

Ключевые слова: Radio-over-Fiber, волоконно-оптические линии передачи, диапазон частот, лазерные диоды, модулятор Маха–Цендера, промышленный интернет, программный пакет Maple 12, ФИМД-сигналы, chirпирование, фазовые шумы

Для цитирования: Виноградова И. Л., Головина Е. Ю. Анализ эффективности генерирования и преобразования оптических ФИМД-сигналов на базе классического RoF-сегмента, основанного на применении двух лазеров // Вестник СибГУТИ. 2024. Т. 18, № 3. С. 28–44. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-3-28-44>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Виноградова И. Л.,
Головина Е. Ю., 2024

Статья поступила в редакцию 14.12.2023;
переработанный вариант – 31.01.2024;
принята к публикации 06.03.2024.

1. Введение

Развитие роботизированных систем и искусственного интеллекта привело к появлению такой концепции в инфокоммуникационной отрасли, как интернет вещей (Internet of Things, IoT), включая промышленный интернет (Industrial Internet of Things, IIoT). Всё это в итоге сейчас формирует такую методологию построения систем связи «последней мили», как «интернет всего», когда взаимодействие происходит не только между удаленным оператором (человеком) и устройством (машиной, аппаратом), но и между автоматическими устройствами без участия человека. Очевидно, что это вызывает резкий рост количества устройств, подключенных к телекоммуникационной сети, с весьма разнородным трафиком [1]. На сего-

дняшний день существуют различные технологии передачи данных, такие как Wi-Fi, LTE (Long Term Evolution), Radio-over-Fiber (RoF) и др.

Беспроводная сеть Wi-Fi позволяет устройствам подключаться и обмениваться информацией на расстоянии до 100 метров. В сети Wi-Fi используется два свободных диапазона частот: 2,4 ГГц и 5 ГГц. Технология Wi-Fi предоставляет большую скорость передачи данных и обладает низкой задержкой, но имеет малый радиус действия. К тому же для подключения Wi-Fi-устройств к волоконно-оптической линии передач (ВОЛП) требуются дополнительные преобразующие устройства, при введении в эксплуатацию которых требуется инсталляция.

Технология LTE обеспечивает связь на значительные расстояния. Изначально данная технология была разработана как элемент сетей связи общего пользования для предоставления услуг подвижной связи. С появлением IoT проводились работы по модернизации стандартов LTE, но технологии этого типа по-прежнему характеризуются высоким энергопотреблением из-за сложных механизмов сигнализации и обеспечения безопасности. Большинство этих функций не требуется для приложений IoT и взаимодействия с большим количеством устройств [2].

Технология RoF является эффективным способом передачи информации с наиболее упрощенной аппаратной частью в сравнении с Wi-Fi и LTE, что обеспечивает минимум энергопотребления и миниатюризацию. Фактически в RoF имеет место аналоговый способ формирования радиосигнала как разностной частоты в результате сложения в нелинейном элементе оптических сигналов на близких несущих. Это позволяет разворачивать RoF-системы буквально «на ходу», что весьма актуально для систем связи специального назначения (военных, МЧС и т.п.). Можно сказать, что RoF совмещает достоинства волоконно-оптических систем с гибкостью и мобильностью, присущими радиосвязи. Данная технология позволяет передавать данные по оптическим волокнам на большие расстояния, а затем преобразовывать их в радиосигналы для беспроводной связи. Это обеспечивает высокую пропускную способность и низкую задержку передачи данных, что важно также для поддержки массового количества устройств в такой сети, как IoT.

Информационная технология RoF изначально основана на принципе получения радиочастотного сигнала гигагерцового диапазона частот посредством фотодетектирования сложного (суммарного) оптического сигнала, содержащего данную радиочастоту как разностную [3], рис. 1. В случае формирования сигнала путем сложения оптических волн от лазерных диодов (LD – laser diode) непрерывного излучения LD1 и LD2 с близкими центральными длинами волн λ_1 и λ_2 (круговыми частотами ω_1 и ω_2 соответственно) вследствие биения частот возникают составляющие: $\omega_1 \pm \omega_2$ [3, 4]. При условии, что ω_3 находится в рабочем диапазоне амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фотодиода (PD – photodetector), а ω_1 и ω_2 лежат в области его спектральной восприимчивости, после PD наблюдается разностная круговая частота: $\omega_3 = |\omega_1 - \omega_2|$.

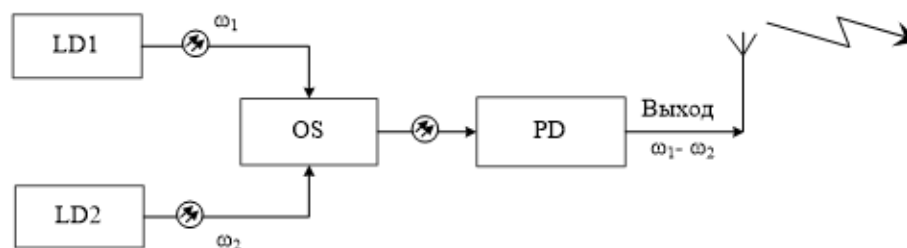


Рис. 1. Генерация разностной частоты ввиду эффекта биения двух оптических волн.
Обозначения: OS – Optical Splitter – оптический разветвитель

Именно это и оправдывает само название Radio-over-Fiber, т.е. передачу радиочастоты (в данном случае ω_3) непосредственно за счет физических эффектов, имеющих место в оптоволокне (ОВ). Если после PD подключить антенный радиоизлучатель, то ω_3 будет излучаться в радиоэфир. Если излучение одного из лазеров ω_1 является непрерывным, а излучение вто-

рого лазера ω_2 модулировано информационным сигналом с полосой $\Delta\omega$ (т.е.: $\omega_2 \pm \Delta\omega/2$ в оптическом канале), то получаемый на выходе фотодиода (а также и в радиолinii) сигнал будет иметь спектр $\omega_3 \pm \Delta\omega/2$.

Ценность таких схем состоит в аппаратной простоте метода генерации радиочастоты f (практически в любом высокочастотном (ВЧ) – радиодиапазоне) с обеспечением заданной полосы канала Δf , простоте перестройки параметров f и Δf в значительных пределах (кратное изменение в разы путем незначительного (проценты) изменения оптических параметров схемы). Поэтому при разработке RoF-схемы для генерирования и преобразования оптических сигналов с функцией изменения мгновенной длины волны (ФИМД) (с трансляцией соответствующих параметров в радиодиапазон) для приложений изначально представляется логичным рассмотреть схему с двумя независимыми лазерами (рис. 1). Эта схема обеспечивает получение радиочастоты в наиболее широком диапазоне (до терагерцовой области) и вполне может использоваться совместно с MZM (MZM – Mach–Zehnder Modulator).

Несмотря на то, что известны работы, в частности [5, 6], в которых в результате экспериментальных исследований подобной схемы делается вывод о значительном дрожании несущей радиочастоты f (возникающей вследствие разности используемых оптических длин волн), увеличивающемся по мере роста f . Дословно¹ авторы пишут, что схемы некогерентной генерации приводят к тому, что радиочастотный сигнал несет суммарный фазовый шум обоих лазеров, и, таким образом, вероятно, фазовый шум выходит за рамки правил ITU для радионесущих [7], если только лазеры не имеют узкую ширину полосы пропускания и жестко контролируются [5]. Схемы самогетеродина, в которых свет от одного лазера разделяется на два оптических тона путем модуляции синусоидой, обеспечивают значительно лучшую фазовую стабильность [5, 6] ценой более сложной генерационной установки. Но в перечисленных работах рассматривается сложный многокомпонентный волоконно-оптический сегмент, кроме того, не получены ограничения на значения радиочастоты и схемные ограничения для ВОЛП-RoF, для которых, возможно, схема на рис. 1 может быть признана работоспособной. Еще раз подчеркнем такое достоинство последней, как аппаратная простота (что, кстати, не отрицают и авторы [5, 6]), что весьма актуально для сегментов промышленного интернета, обслуживающих каналы передачи мониторинговой информации. Поэтому представляется интересным проанализировать возможность применения упомянутой схемы (рис. 1) в применении для сегментов промышленного интернета.

2. Материалы и методы

Выполнение ФИМД (чирпирования) оптических сигналов может быть реализовано в различных её частях, рис. 2: а) в канале² включения первого лазера (λ_1), б) второго лазера (λ_2), в) на входе ВОЛП-RoF и г) на выходе ВОЛП-RoF. Как известно, ФИМД-сигнал может использоваться для различных целей – для компенсации дисперсии, тогда более актуальными являются схемы а) ÷ в) на рис. 2, или для формирования радиочастотных свойств канала средствами волоконной оптики, для чего важен ФИМД-сигнал на выходе ВОЛП-RoF, подаваемый непосредственно на радиоизлучающее устройство, т.е. схема г) на рис. 2. Для последней упомянутой задачи можно использовать и первые три схемы, если известны свой-

¹ Incoherent generation schemes result in the RF signal carrying the combined phase noise of both lasers – and thus likely a phase noise that is outside of ITU regulations for radio carriers [7], unless the lasers are of narrow linewidth and tightly controlled [5]. The self-heterodyne schemes where the light from a single laser is split into two optical tones by modulating it with a sinusoid, provide significantly better phase stability [5,6] at the cost of a more complex generation setup.

² Чирпирование может достигаться как с применением отдельного блока (устройства, схемы), основанного, например, на применении нелинейных оптических эффектов, входящего в состав сегмента, как показано на рис. 2, так и с применением чирпирующего MZM либо специализированного интерфейса управления лазером.

ства ВОЛП-RoF. Но в любом случае следует получить оценку влияния шумов лазеров, чтобы определиться с областью применения данной схемы.

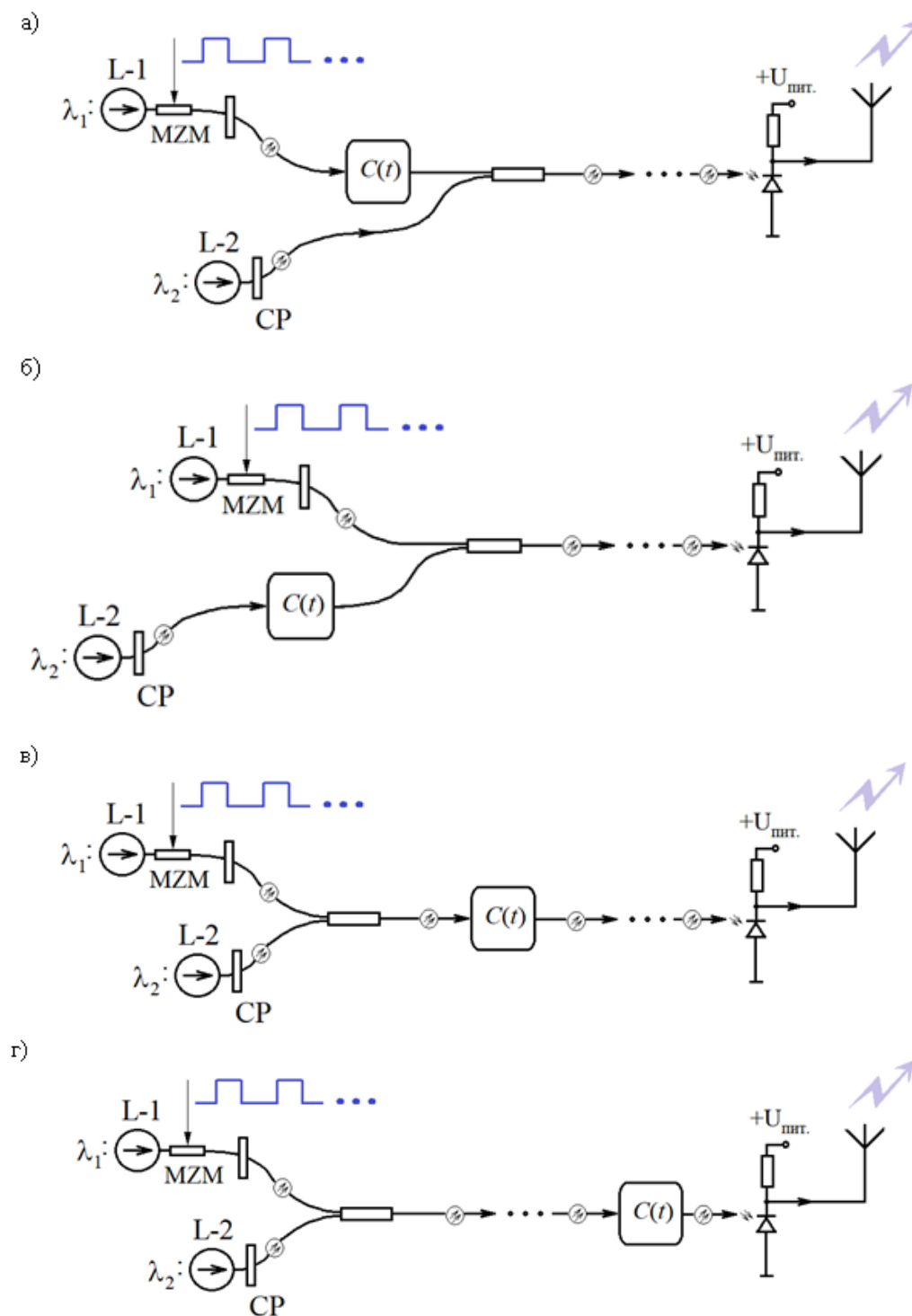


Рис. 2. Иллюстрация расположения блока (устройства, схемы), обеспечивающего получение ФИМД-сигнала в RoF-сегменте (обозначено $C(t)$); CP – контроллеры поляризации

Так, согласно [8, 9] основными неидеальностями (шумами, искажениями) полупроводниковых лазеров являются:

- 1) предел монохроматичности, или конечная ширина линии излучения;

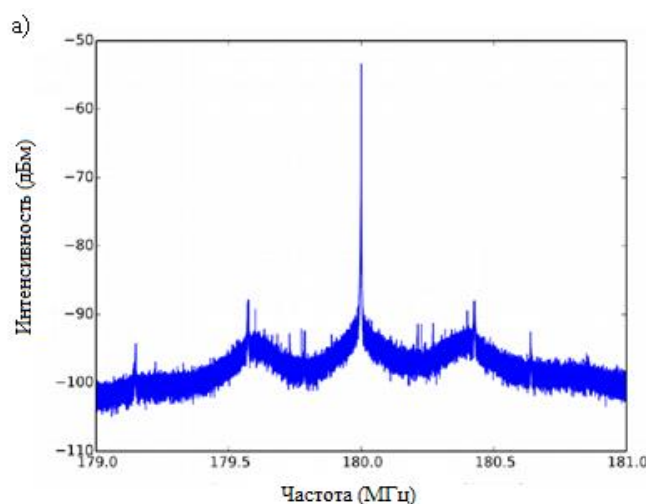
2) блуждание центральной частоты основной генерируемой моды, что связано с изменениями длины резонатора, вызванными вибрациями, флуктуациями температуры и давления, проявляющее как кратковременный ($\sim 10^{10} \div 10^{12} \text{ с}^{-1}$), так и долговременный ($\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$ или менее) характер;

3) фазовый шум, обусловленный тем, что каждый самопроизвольно излучаемый фотон добавляет к когерентному полю (определяемому стимулированным излучением) небольшую компоненту, фаза которой является случайной, что и возмущает фазу поля случайным образом. Кроме того, при изменении оптического усиления (при вариации населенности носителей) показатель преломления активной среды также изменяется, что сопровождается фазовой модуляцией (и в итоге также приводит к конечной ширине спектральной линии);

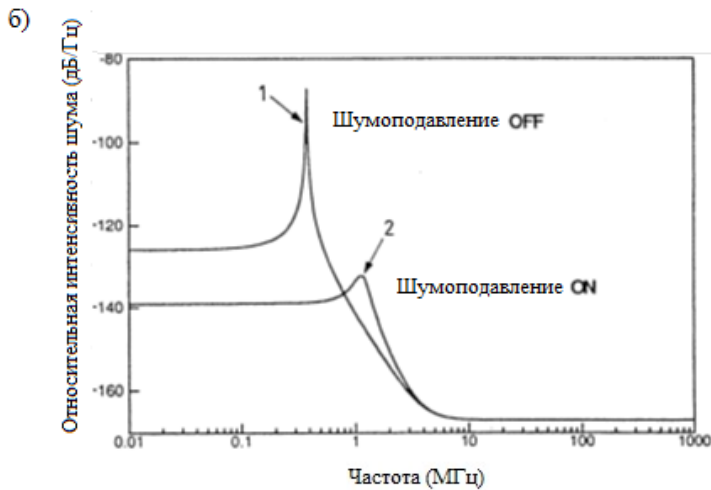
4) флуктуации тока смещения и связанное с ним блуждание амплитуды, вызванные спонтанностью характера излучения и шумом электронно-дырочной рекомбинации (дробовой шум) как кратковременный процесс, а также и долговременный дрейф выходной мощности, возникающий из-за теплового смещения резонатора, деградации зеркал и других компонентов лазера, включая изменение параметров активной среды (relative intensity noise – RIN);

5) шум модового распределения MPN (антифазная динамика [9]), связанный с тем, что при генерации нескольких мод, даже если общая мощность остается постоянной, мощность в каждой моде (основной и малых боковых³, которые могут быть даже на 20 дБ ниже основной, рис. 3а) колеблется во времени, что представляет серьезную проблему для поддержания интенсивности в каждой моде. При этом мощность боковых мод колеблется от 0 до их наибольшего значения и вызывает соответствующее колебание мощности основной моды при практически незаметной интенсивности результирующего излучения (что значительно увеличивает RIN основной моды на частотах ниже его максимума в диапазоне 0–1 ГГц, рис. 3б. Физическое происхождение боковых мод связано с релаксационными колебаниями [9].

Если рассматривать задачу использования ФИМД-сигнала для управления фазированными антенными решетками (ФАР) на сегментах промышленного интернета, тогда стабилизация частотных свойств лазеров особенно актуальна. Однако в этом направлении в настоящее время разработаны и являются коммерчески доступными большое количество моделей лазеров с общей шириной линии (включая блуждания центральной частоты) в пределах до 1 кГц [10–23], рис. 3в, что представляется вполне достаточным. Известны даже модели с шириной линии существенно менее 1 кГц.



³ Для значительного количества моделей DFB-лазеров характерны дополнительные низкие продольные моды, в случае VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser) это могут быть поперечные моды.



RIN значителен до частоты, соответствующей релаксационным колебаниям лазерной среды (в большинстве случаев – до 300 кГц). Далее RIN заметно снижается, а для Signal-to-Noise Ratio (SNR) характерно насыщение, что обеспечивает ему слабую зависимость от мощности [9].

В рассматриваемой задаче характерные частоты составляют несколько десятков МГц, следовательно, можно рассматривать область низкого RIN.



Рис. 3. Параметры полупроводниковых лазеров: (а) спектр излучения ультраузкополосного DFB-лазера [23]; (б) типичные спектры шума относительной интенсивности (RIN) для лазера с диодной накачкой без (кривая 1) и с активным шумоподавлением (2) [11] с отрицательной обратной связью; (в) модели коммерчески доступных ультраузкополосных лазеров

Так, в [23] экспериментально установлена ширина линии в пределах до 200 Гц, авторы об этом пишут следующее⁴: демонстрируется миниатюрный DFB-лазер с самоинжекционной блокировкой, использующий резонансную оптическую обратную связь от высокодобротного кристаллического резонатора в режиме шепчущей галереи. Коэффициент уменьшения ширины полосы пропускания составляет более 10.000, а мгновенная ширина полосы пропускания в результате не превышает 200 Гц. Минимальное значение отклонения Аллана для стабильности частоты лазера составляет 3×10^{-12} при времени интегрирования 20 мкс. Лазер обладает превосходной спектральной чистотой и хорошей долговременной стабильностью.

Безусловно, для таких лазеров требуется термостабилизация лучше, чем 0.01°C [10 и др.], а также желательна виброизоляция. Указанные характеристики достигаются такими факторами, как: введение обратной связи с частотным дискриминатором, использующим атомный или молекулярный резонанс⁵, оптогальванический эффект⁶, применение контура фазовой синхронизации с интерференционной подстройкой⁷, фильтров с гребенчатым пери-

⁴ We demonstrate a miniature self-injection locked DFB laser using resonant optical feedback from a high-Q crystalline whispering gallery mode resonator. The linewidth reduction factor is greater than 10.000, with resultant instantaneous linewidth less than 200 Hz. The minimal value of the Allan deviation for the laser frequency stability is 3×10^{-12} at the integration time of 20 μs . The laser possesses excellent spectral purity and good long term stability.

⁵ Для привязки частоты выходного излучения к резонансной частоте лазера.

⁶ Для фиксации частоты лазера до атомного или молекулярного резонанса, что имеет место в MQW-лазерах, особенно для напряженных квантовых ям [18]. Это же справедливо и для предыдущего случая.

⁷ С интерферометром Майкельсона, откалиброванным посредством стабилизированного мастер-лазера DFB, что обеспечивает набор одинаково расположенных опорных частот, либо эталона Фабри-Перо (FP) с контуром контроля температуры эталона.

одическим спектром (например, AWG) с эталонным набором частот. Как правило, это лазеры FP-DFB или MQW-DFB.

Для того чтобы оценить влияние фазового шума лазеров для схемы на рис. 2, определим ток фотодиода J_{PD} (а значит, и мощность радиоизлучения, учитывая также, что фотодиод, как правило, обладает квадратичной передаточной функцией) через амплитуды⁸ излучения лазеров:

$$J_{PD} = K_{PD} \cdot (E_1 + E_2)^2, \quad (1)$$

где $E_{1,2} = E_{01(02)} \cdot \left(\cos(\omega_{1,2}t + \langle \phi_{1,2}(t) \rangle) + \sin(\omega_{1,2}t + \langle \phi_{1,2}(t) \rangle) \right)$, K_{PD} – коэффициент оптоэлектронного преобразования фотодиода $\langle \phi_{1,2}(t) \rangle$ – усредненные величины фазовых отклонений.

Если раскрыть квадрат суммы, выполнить тригонометрические преобразования и учесть при этом, что $(E_1)^2$ и $(E_2)^2$ определяют интенсивности соответствующих излучений, получим:

$$J_{PD} = K_{PD} \cdot \left(I_1 + I_2 + 2E_1E_2 \cdot \cos(|\omega_1 - \omega_2|) \cdot \left(1 - \sin(|\langle \phi_1(t) \rangle + \langle \phi_2(t) \rangle|) \right) \right). \quad (2)$$

При выводе (2) учтено соотношение для косинуса разности, а также приравнены нулю деструктивные (не имеющие физического смысла) члены вида: $2E_{01(02)} \cos(\omega_{1,2}t) \cdot \sin(\omega_{2,1}t)$. В (2) также предполагается, что круговые частоты ω_1 и ω_2 являются близкими, соответствуют λ_1 и λ_2 , и обе длины волны приблизительно одинаково воспринимаются фотодиодом ($K_{PD1} = K_{PD2} = K_{PD}$). Значения фазовых отклонений $\langle \phi_{1,2}(t) \rangle$ несложно найти из технических данных лазеров: $\langle \phi_{1,2}(t) \rangle \cong \varphi \cdot \Delta\nu$, где φ представляет параметр PhN и равен $\cong 20$ мрад/Гц для рассматриваемых типов моделей лазеров [21, 22]. Если $\Delta\nu = 1$ кГц, то можно говорить о фазовых скачках порядка 10^{-2} рад, которые для времен порядка 10^{-12} с (субтерабитные скорости передачи информации; учитываем также, что ω имеют порядок 10^{14} рад/с) приведут к заметному (т.е. того же порядка) блужданию радиочастоты $\Omega = \omega_1 - \omega_2$. Но на сегментах промышленного интернета в настоящее время такие битовые скорости маловероятны, следовательно, фазовый шум лазеров скажется существенно (на 1–2 порядка) меньше, и им в первом приближении можно пренебречь.

При выполнении анализа влияния амплитудного шума на работоспособность схемы на рис. 2 следует учитывать также и возможный отраженный сигнал на ВОЛП-RoF, хотя большинство современных моделей лазеров снабжены оптическими изоляторами. Последние значительно снижают попадание отражений в лазер, но не компенсируют его полностью (остаточный уровень находится в пределах ≈ -70 дБ). Такое значение мало сказывалось бы для классических ВОЛП, но в рассматриваемой схеме лазеры оказываются связанными по интенсивности. RIN также вносит сюда свой вклад.

Так, в [24, 25] показано, что для инженерного моделирования интенсивности оптического сигнала на выходе двух связанных (по интенсивности) лазеров допустимо использовать следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_1(t)}{\partial t} &= \gamma P_1(t) G_n - I_1(t) - k_{11} I_1^2(t) - k_{21} \bar{I}_1(t - \tau) I_2(t), \\ \frac{\partial I_2(t)}{\partial t} &= \gamma P_2(t) G_n - I_2(t) - k_{22} I_2^2(t) - k_{12} \bar{I}_2(t - \tau) I_1(t), \end{aligned} \quad (3)$$

⁸ Речь идет о напряженностях электрического поля световых волн E_1 и E_2 , вызывающих фотоэффект. В (1) не учитываются потери на линейное затухание и дисперсия ввиду малой длины ВОЛП-RoF.

где k_{lm} – коэффициенты инжекционной взаимосвязи между процессами в резонаторах лазеров; P_1 и P_2 – параметры накачки: $P_{1,2}(t) = \frac{J_{1,2}(t)}{J_{th}} - 1$, где $J_1(t)$ и $J_2(t)$ – токи накачки лазеров

соответственно, и J_{th} – пороговый ток накачки для лазера без обратной связи (считаем эти значения одинаковыми для рассматриваемых лазеров); G_n – характеризует динамическое мо-

довое усиление (считаем, что оба лазера похожи конструктивно): $G_n = \frac{G_0}{1 + \delta\omega^2 \cdot \tau_s^2 + \frac{I(t)}{I_{0,n}}}$.

Здесь $\delta\omega$ – разность частот поступающего оптического излучения и рабочего квантового перехода электрона; τ_s – время жизни неравновесных носителей; $I_{0,n}$ – интенсивность насыщения (также считаем, что оба лазера обладают примерно одинаковыми динамическими свойствами). Текущее время нормировано на время жизни фотонов в резонаторе: t/τ_{th} , T – отношение времен жизни неравновесных носителей и фотонов, т.е. $T = \frac{\tau_s}{\tau_{th}}$. В (3) учтено, что

изменение интенсивности прямо пропорционально (γ) параметрам накачки и параметрам усиления. Будем считать, что ВОЛП-RoF не является длинной, следовательно, дисперсией и погонным затуханием можно пренебречь.

3. Результаты

Численное моделирование динамического характера изменения интенсивностей излучения для различных значений отстройки $\delta\omega = |\omega_1 - \omega_2|$ на выходе короткой ВОЛП-RoF проведено для DFB-лазеров с параметрами: $\tau_s = 1$ нс, $\tau_{th} = 1$ пс, $J = 2.2 J_{th}$. При выборе значений τ_s и τ_{th} предполагалось, что длительность τ_{th} определяется эффективным количеством переотражений в резонаторе Фабри–Перо DFB-лазера, умноженным на длительность одного прохода; длительность τ_s приблизительно определяется длительностью импульса в системе передачи, а ток накачки J должен обеспечивать работу лазера в когерентном режиме, т.е.кратно превосходить пороговый ток J_{th} . Значение, равное 2.2, принято для моделирования как эффективно усредненная величина.

Для получения результатов моделирования было применено численное интегрирование уравнений (3) с использованием программного пакета Maple 12. На рис. 4 представлены графические зависимости относительных интенсивностей (отнесенных к усредненному за интервал наблюдения значению $\overline{I_M}$) как функций времени (а), а также характера изменения величины разности $\Delta I = |I_1 - I_2|_{\max}$, тоже⁹ отнесенного к $\overline{I_M}$, и характера изменения со временем периода осцилляций Ξ для функций $I_1(t)$ и $I_2(t)$ – рис. 4б. Отличие кривых на рис. 4а от строго гармонических связано, по-видимому, с нелинейным характером уравнений (3) и, возможно, с погрешностями численного интегрирования. Кривые построены для различных значений ρ уровня отраженного сигнала¹⁰ и $\delta\omega$, характеризующей различие λ_1 и λ_2 . Так, на рис. 4а кривые 1 построены для $\rho = 0.01$, а кривые 2 – $\rho = 0.02$. При этом $\delta\omega = 6.28 \cdot 10^9$ рад/с, что соответствует радиочастоте в 1 ГГц. На рис. 4б все кривые построены для $\rho = 0.01$, но

⁹ $\overline{I_{1,2,M}}$ – средние значения интенсивностей за интервал наблюдения; считаем, что для первого и второго лазера они одинаковы.

¹⁰ Параметр ρ определяет коэффициенты k_{ij} в (3) с учетом RIN обоих лазеров.

для: 1 – $\delta\omega = 4.84 \cdot 10^{11}$ рад/с (77 ГГц), 2 – $\delta\omega = 6.28 \cdot 10^{10}$ рад/с (10 ГГц), 3 – $\delta\omega = 6.28 \cdot 10^9$ рад/с (1 ГГц) и 4 – $\delta\omega = 1.26 \cdot 10^9$ рад/с (200 МГц).

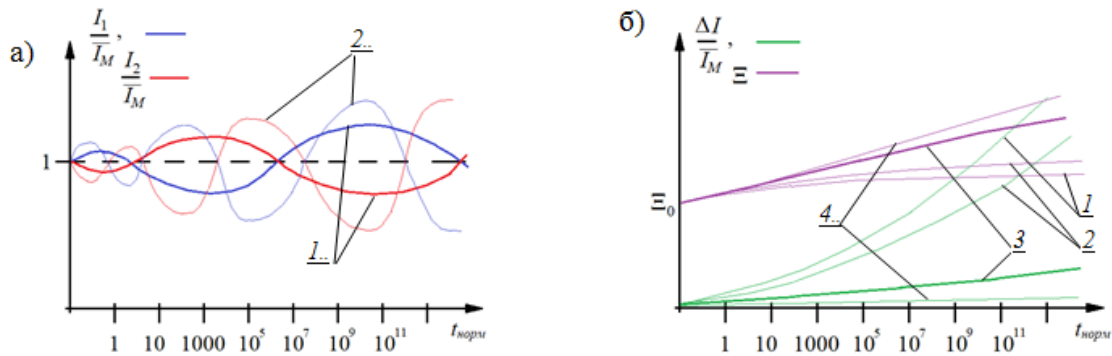


Рис. 4. Иллюстрация характера изменения интенсивностей излучения:
(а) их разностей и периода осцилляций; (б) для RoF-сегмента с двумя лазерами

Отсюда видно, что для больших значений ρ (свыше 0.01) и $\delta\omega$ (уже начиная с $6.28 \cdot 10^9$ рад/с) система ведет себя как неустойчивая – амплитуда осцилляций увеличивается, а период осцилляций сначала немного увеличивается, а затем остается в пределах некоторой практически установившейся величины. Расчеты проведены для случая отсутствия ограничений по интенсивности излучения. Очевидно, что в реальной ситуации увеличение интенсивности ограничится её наибольшим значением, определяющимся электропитанием лазера. К тому же в расчетах не было учтено погонное затухание линии, учет которого приведет к увеличению характерного значения ρ , вызывающего колебания интенсивностей.

Рост периода осцилляций наблюдается от линейно нарастающего до асимптотически устанавливающегося. Увеличение периода (в том числе линейное нарастание) свидетельствует о переходе осцилляций к установившемуся неколебательному состоянию (т.е. к отсутствию осцилляций), а значит, имеет место стабилизация системы. Если же период со временем не увеличивается, то осцилляции в системе остаются, следовательно, система является нестабильной.

Иными словами, для RoF-сегмента с двумя лазерами, между которыми не предусмотрена конструктивная взаимосвязь для стабилизации их работы, даже без использования чирпирующих компонентов наблюдается блуждание интенсивностей излучения, приводящее и к изменению тока фотодиода (по (2), (3)), а значит, и мощности радиосигнала. В случае присутствия в линии (в том числе в радиолинии) элемента с характеристикой вида «амплитуда ↔ частота», что свойственно для ряда нелинейных схем, то действительно в сегменте будут присутствовать фазовые шумы, мешающие радиосвязи, что хорошо согласуется с [5, 6]. Однако эти шумы остаются весьма незначительными для ρ не выше 0.01, а также для близко расположенных λ_1 и λ_2 : в частотном измерении не далее, чем в пределах нескольких сот МГц¹¹. В этом случае осцилляции интенсивностей излучения со временем прекращаются (их период неограниченно возрастает). При увеличении параметра $\delta\omega$ все выглядит наоборот: система от почти стабильной переходит к нестабильной.

Чтобы оценить применимость данной схемы для рассматриваемой задачи, проведем исследование происходящих в ней процессов, но с учетом оптических ФИМД-сигналов. Последние могут быть получены: изменением тока накачки одного из лазеров, в результате включения чирпирующего MZM [26 и др.] либо устройства управления сигналами, например, такого как [27] по схемам, представленным на рис. 2. Для этого воспользуемся подходом к моделированию, аналогичным (3), но уже по отношению к напряженности поля E .

¹¹ Расчеты проведены для случая отсутствия блуждания центральной частоты излучения лазеров.

Так, в работе [24] Лэнг и Кобаяши ввели простую модель, описывающую работу лазера с обратной связью системой из двух дифференциальных уравнений, которые с учетом нормировки и введенного по аналогии с [28] параметра Φ , характеризующего отклонение частоты излучения для ФИМД-сигнала, приобретают вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial s} = (1 + j \cdot a) \cdot N \cdot E + \eta \cdot e^{-j\Phi} E(s-1), \\ \frac{T}{\tau} \frac{\partial N}{\partial s} = p - N - (1 + \frac{2}{\tau} N) |E|^2. \end{cases} \quad (4)$$

В (4) строго согласно [24] используются следующие обозначения: s – время прохода излучения по внешнему контуру (линии), представленное (нормированное) в единицах времени жизни неравновесных носителей τ_s ; a – коэффициент, связывающий текущие амплитуду и фазу поля; N – концентрация неравновесных носителей; η – коэффициент отражения; τ – время распространения излучения в резонаторе, нормированное на время τ_s ; T – отношение времен жизни носителей и фотонов; p – нормированный параметр, характеризующий эффективность накачки.

Поэтому подобно тому, как это показано в [24], запишем систему уравнений для рассматриваемых лазеров с учетом Φ :

$$\begin{cases} \frac{\partial E_1(s)}{\partial s} = \left(1 + j \cdot \frac{\psi(s) \cdot E_{0,1}}{|E_1(s)|} \right) N_1(s) E_1(s) + k_{E,11} e^{-j\Delta\Phi_1(s-1)} E_1(s-1) + \\ \quad + k_{E,21} e^{-j\Delta\Phi_2(s-1)} E_2(s-1) |E_1(s-1)|, \\ \frac{T}{\tau} \frac{\partial N_1(s)}{\partial s} = p - N_1(s) - \left(1 + \frac{2}{\tau} N_1(s) \right) |E_1(s)|^2; \\ \frac{\partial E_2(s)}{\partial s} = \left(1 + j \cdot \frac{\psi(s) \cdot |E_{0,1} - E_{0,2}|}{|E_1(s) - E_2(s)|} \right) N_2(s) E_2(s) + k_{E,22} e^{-j\Delta\Phi_2(s-1)} E_2(s-1) + \\ \quad + k_{E,12} e^{-j\Delta\Phi_1(s-1)} E_1(s-1) |E_2(s-1)|, \\ \frac{T}{\tau} \frac{\partial N_2(s)}{\partial s} = p - N_2(s) - \left(1 + \frac{2}{\tau} N_2(s) \right) |E_2(s)|^2. \end{cases} \quad (5)$$

В (5) дополнительно приняты обозначения: $\psi(s)$ – фаза модулированного¹² излучения (переносящего информационный сигнал); $\Delta\Phi_1(s) = \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{\partial \psi(s)}{\partial s} - 1$; $\Delta\Phi_2(s) = \frac{1}{\omega_2} \cdot \frac{\partial \psi(s)}{\partial s} - \frac{\omega_1}{\omega_2}$; величины $E_{0,1}$ и $E_{0,2}$ – амплитудные значения функций $E_1(s)$ и $E_2(s)$; коэффициенты $k_{E,11}$, $k_{E,12}$, $k_{E,21}$ и $k_{E,22}$, аналогичны введенным в (3) с тем отличием, что относятся не к интенсивности, а к напряженности поля. Так же, как и выше, считаем, что динамические и мощностные характеристики лазеров приблизительно одинаковы.

¹² Предполагается, что модуляцию, т.е. введение информационного сигнала, осуществляет модулятор Маха-Цендера (MZM), располагающийся, например, в плече первого лазера, см. рис. 2.

Согласно введенной¹³ и используемой в настоящей статье ФИМД-функции $C_{\omega 1}$ заметим,

$$\text{что } \Delta\Phi_1(s) = \frac{\frac{\partial\psi(s)}{\partial s} - \omega_1}{\omega_1} = \frac{c_{\omega 1}(s)}{\omega_1}, \quad \Delta\Phi_2(s) = \frac{1}{\omega_2} \cdot \frac{\partial\psi(s)}{\partial s} - \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{c_{\omega 1}(s)}{\omega_2}.$$

При большой задержке, когда $\tau \gg 1$ (т.е. когда ВОЛП-RoF много длиннее, чем резонатор лазера), можно полагать, что $\partial N / \partial s = 0$ (по аналогии с [24]), и система сводится к двум уравнениям, аналогичным (3) для каждого из рассматриваемых лазеров. Кроме того, для каждого из лазеров согласно [24] справедливо:

$$\frac{\partial E}{\partial s} = (1 + i \cdot \alpha) \cdot (p - |E|^2) \cdot E + \eta \cdot e^{-i\Phi} E(s-1). \quad (6)$$

Если по аналогии с (6) представить полученные выше уравнения (5) и учесть соотношения для функции $C_{\omega 1}(s)$, тогда запишем:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial E_1(s)}{\partial s} &= \left(1 + j \cdot \frac{\psi(s) \cdot E_{0,1}}{|E_1(s)|} \right) (p - |E_1(s)|^2) E_1(s) + k_{E,11} e^{-j \frac{c_{\omega 1}(s-1)}{\omega_1}} \cdot E_1(s-1) + \\ &\quad + k_{E,21} e^{-j \frac{c_{\omega 1}(s-1)}{\omega_2}} \cdot E_2(s-1) |E_1(s-1)|, \\ \frac{\partial E_2(s)}{\partial s} &= \left(1 + j \cdot \frac{\psi(s) \cdot |E_{0,1} - E_{0,2}|}{|E_1(s) - E_2(s)|} \right) (p - |E_2(s)|^2) E_2(s) + k_{E,22} e^{-j \frac{c_{\omega 1}(s-1)}{\omega_2}} \cdot E_1(s-1) + \\ &\quad + k_{E,12} e^{-j \frac{c_{\omega 1}(s-1)}{\omega_1}} \cdot E_1(s-1) |E_2(s-1)|. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Таким образом, система уравнений (7) характеризует изменение параметров излучения в RoF-линии в случае оптического ФИМД-сигнала.

Учитывая, что интенсивность излучения представляет собой величину $I_{1,2} = \frac{\dot{E}_{1,2} \cdot \dot{E}_{1,2}^*}{2Z_B}$,

где $\dot{E}^*$ – комплексно-сопряженное к $\dot{E}$, а Z_B – волновое сопротивление линии, получаем результаты моделирования, аналогичные представленным выше, см. рис. 5. Расчет проведен для $\rho = 0.01$, отличия частот лазерного излучения на $6.28 \cdot 10^9$ рад/с (1 ГГц), для следующих наибольших значений функции: $C_{\omega 1} = 6.28 \cdot 10^4$ рад/с (10 кГц) – кривая 1 на рис. 5а и кривая 1 на рис. 5б; $C_{\omega 1} = 1.57 \cdot 10^5$ рад/с (25 кГц) – кривая 2 на рис. 5б; $C_{\omega 1} = 3.14 \cdot 10^5$ рад/с (50 кГц) – кривая 3 на рис. 5б; $C_{\omega 1} = 4.71 \cdot 10^5$ рад/с (75 кГц) – кривая 2 на рис. 5а и кривая 4 на рис. 5б. В случае, если увеличить частотное расстояние между лазерами, а также и наибольшее значение ФИМД-функции, получаем существенные осцилляции интенсивностей лазеров, а также и частоту осцилляций, начинающую попадать (паразитно) в частотные диапазоны ВЧ/ШП/СШП-сигналов. Кроме того, если для малых $\delta\omega$ на рис. 4 имела место определенная стабилизация (точнее – квазистабильзация) указанных осцилляций (неограниченный рост периода Ξ , рис. 4б, например, кривая 4, говорит о снижении эффективности осцилляций), то

¹³ Явление chirpирования излучения весьма по-разному представлено в литературе – начиная от неизменного параметра (коэффициента) [29], включая линейно меняющуюся величину (ЛЧМ – линейная частотная модуляция [31]), что связано с традиционно сложившимся дисперсионным характером его приобретения, и заканчивая произвольной функциональной зависимостью [30–34]. Здесь мы придерживаемся того, что ФИМД-функция может быть произвольной.

в рассматриваемом случае подобный режим удастся получить только для $C_{\omega 1} \leq 6.28 \cdot 10^3$ рад/с (1 кГц), что весьма мало для многих технических приложений.

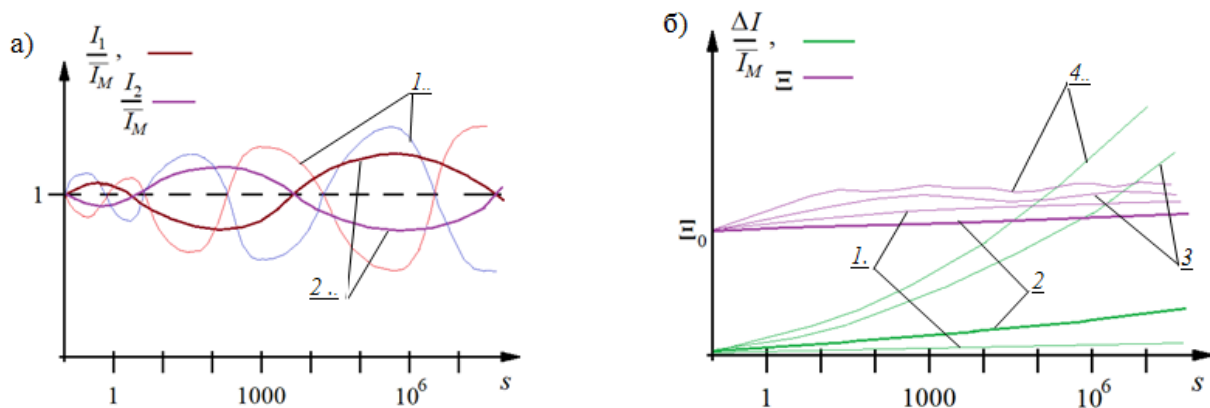


Рис. 5. Иллюстрация характера изменения интенсивностей излучения (а), их разностей и периода осцилляций (б) для RoF-сегмента с двумя лазерами, построенного по схеме рис. 2а, для случая чирпующего MZM

Напротив, для рассмотренных значений ФИМД наблюдается характерное блуждание параметра Ξ (попеременное уменьшение и увеличение), что фактически действительно говорит о наличии фазового шума в системе. Определенная более-менее приемлемая ситуация имеет место для $C_{\omega 1} = 6.28 \cdot 10^4$ рад/с (10 кГц), что может найти техническое приложение, например, в задаче обеспечения информационной безопасности радиоканала в виде «прыгающей частоты» для нешироких канальных интервалов (до 500 МГц). Для ФИМД же со значениями $C_{\omega 1} = 4.71 \cdot 10^5$ рад/с (75 кГц) период Ξ начинает заметно блуждать и проявляется заметный рост разности интенсивностей ΔI , что фактически свидетельствует об оптическом хаосе [35] и приводит канал уже в неработоспособное состояние.

4. Обсуждение и заключение

В результате выполненного моделирования работы RoF-схемы, основанной на взаимодействии излучений двух конструктивно не связанных лазеров, можно сделать следующий вывод. Действительно, данной схеме присущи значительные фазовые шумы (что согласуется с результатами экспериментальных исследований) в случае, когда отличие центральных частот лазеров соответствует радиочастоте уже начиная от единиц ГГц и выше. Следует отметить, что указанное моделирование выполнено без учета многих дополнительно влияющих факторов, что на практике, скорее всего, еще снизит указанный порог. Тем не менее определен диапазон¹⁴ параметров (по отличию частот лазеров и по наибольшему допустимому значению ФИМД), когда рассматриваемая схема обеспечивает относительно стабилизированный режим работы, а значит, может найти применение если не в задачах абонентских сетей (из-за малого значения радиочастоты, что на сегодняшний день неактуально), то в задачах промышленного интернета.

¹⁴ Справедливости ради нельзя не отметить, что полученные параметры стабильной работы схемы по рис. 2 могут быть присущи либо чрезвычайно узкополосным (которые должны быть высокостабилизированными) двум лазерам, либо находятся внутри единственной полосы излучения типового (недорого) полупроводникового лазера.

Литература

1. Виноградова И. Л., Головина Е. Ю. Использование технологии Radio-over-Fiber в системах связи // Сборник научных статей по материалам XIII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники», Уфа, 24 ноября, 2023. С. 84–88.
2. Фам Ван Дай. Разработка моделей и методов маршрутизации в энергоэффективных ячеистых сетях дальнего радиуса действия: автореф. дис. ...канд. техн. наук. СПб. 2021. 160 с.
3. Solomon Tesfay Abraha. Impulse Radio Ultra Wideband over Fiber Techniques for Broadband In-Building Network Application. Abstract Ph. D. thesis. Netherlands. 2012. 192 p.
4. Haymen Shams. Radio over Fiber Distribution Systems for Ultra Wideband and Millimetre wave Applications. Abstract Ph. D. thesis. Dublin. 2011. 158 p.
5. Kanno A., Dat P. T., Kuri T., Hosako I., Kawanishi T., Yoshida Y., and Kitayama K. Evaluation of frequency fluctuation in fiber wireless link with direct IQ down-converter // Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC), 2014. P. 1–3.
6. Gliese U., Norskov S., and Nielsen T. N. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 1996. V. 44, № 10. P. 1716–1724.
7. Recommendation ITU-R SM.1045-1. Frequency tolerance of transmitters. Electronic Publication, 1997. P. 5.
8. Svelto O. Principles of Lasers. Springer Science & Business Media, 2010. 620 p.
9. Agrawal G. P. Fiber-optic communication systems with CD. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2010. 4nd ed. 588 p.
10. Uekara N. and Ueda K. 193-mHz Beat Linewidth of Frequency Stabilized Laser-Diode-Pumped Nd:YAG Ring Lasers // Opt. Lett. 18. 1993. P. 505–507. DOI: 10.1364/ol.18.000505.
11. Scheps R. Introduction to Diode-Pumped Solid-State Lasers. Lightwave Electronics Corp. Techn. Information, 2003. 120 p.
12. Ikegami T., Sudo S., and Sakai Y. Frequency Stabilization of Semiconductor Laser Diodes. Artec House. Boston, 1995. 356 p.
13. Guy M., Villeneuve B., Latrasse C., and Tètu M. Simultaneous absolute frequency control of laser transmitters in both 1.3 and 1.55 μ m bands for multiwavelength communication-systems // Journal of lightwave technology. 1996. P. 1136–1143.
14. Lee H., Lyu G. Y., Park S. Y., and Lee J. H. Multichannel wavelength locking using transmission peaks of an AWG for multichannel optical transmission systems // IEEE Photonics Technology Letters. 1998. V.10, № 2. P. 276–278.
15. Park Y., Lee S. T., and Chae C. J. A novel wavelength stabilization scheme using a fiber grating for WDM transmission // IEEE Photon. Technology Letters. 1998. V. 10, № 10. P. 1446–1448.
16. Ono T. and Yano Y. Key technologies for terabit/second WDM systems with high spectral efficiency of over 1 bit/s/Hz // IEEE J. Quantum Electron. 1998. V. 34. P. 2080–2088.
17. Nasu H., Takagi T., Shinagawa T., Oike M., Nomura T., and A. Kasukawa. A Highly Stable and Reliable Wavelength Monitor Integrated Laser Module Design // Journal Lightwave Technology. 2004. V. 22. P. 1344–1351.
18. Nasu H., Mukaihara T., Takagi T., Oike M., Nomura T., and Kasukawa A. Wavelength monitor integrated laser modules for 25-GHz-spacing tunable applications // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2005. V.11, № 1. P. 157–164.
19. Tissot Y., Limberger H. G., and Salathe R.-P. Ultrawide bandwidth wavelength monitor based on a pair of tilted fiber Bragg gratings // IEEE Photon. Technology. Letters. 2007. V. 19. P. 1702–1704.
20. Liang W., Ilchenko V. S., Savchenkov A. A., Matsko A. B., Seidel D., and Maleki L. Whispering gallery mode resonator based ultra-narrow linewidth external cavity semiconductor laser // Optics letters. 2010. V. 35. P. 2822–2824.

21. Thorlabs. Models: EM650 High Power DFB Laser Module; SFL1550S. URL: <https://www.thorlabs.com/> (дата обращения: 11.09.2023).
22. Model RIO PLANEXSeries 1550nm Low Phase Noise Narrow Linewidth External Cavity Laser, Redfern Integrated Optics (RIO). URL: <http://rio-lasers.com/> (дата обращения: 01.10.2023).
23. Consolino L., Nafa M., Cappelli F., Garrasi K., Mezzapesa F. P. et al. Fully phase-stabilized quantum cascade laser frequency comb // *Electronic and Electrical Engineering*. 2018. V. 2, № 5. P. 231–237.
24. Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties // *IEEE J. Quantum Electron.* 1980. P. 347–355.
25. Javaloyes J., Mandel P., Pieroux D. Dynamical properties of lasers coupled face to face // *Physical review. Statistical, nonlinear, and soft matter physics*. 2003. P. 11.
26. Burdin V. A., Dashkov M. V., Volkov K. A. Application of dispersion managed soliton regime in radio-over-fiber systems // *Proceedings of SPIE*. 2012. V. 8787. P. 1–6.
27. Abdrakhmanova G. I., Andrianova A. V., Vinogradova I. L., Yantilina L. Z., Grahova E. P. et al. Interference fiber optic device for RoF antenna radiators control // *Proc. International Siberian Conference on Control and Communications*, 2016. P. 1–6.
28. Agrawal G. P. *Nonlinear fiber optics*. Boston: Academic Press, 2009. 466 p.
29. Chorchos L., Rommel S., Turkiewicz J. P., Monroy I. T., and Vegas Olmos J. J. Reconfigurable Radio Access Unit for DWDM to W-Band Wireless Conversion // *IEEE Photonics technology letters*. URL: http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html/ (дата обращения: 08.10.2023).
30. Meijerink A., Roeloffzen C. G. H., Meijerink R., Zhuang L., Marpaung D. A. I. et al. Novel Ring Resonator-Based Integrated Photonic Beamformer for Broadband Phased Array Receive Antennas – Part I: Design and Performance Analysis // *J. lightwave technology*. January 2010. V. 28, № 1. P. 3–18.
31. Zhuang L., Roeloffzen C. G. H., Meijerink A., Burla M., Marpaung D. A. I. et al. Novel Ring Resonator-Based Integrated Photonic Beamformer for Broadband Phased Array Receive Antennas – Part II: Experimental Prototype // *Journal of lightwave technology*. January 2010. V. 28, № 1. P. 19–31.
32. Alphones A. and Thai P. Q. Hybrid Approach for Optical Beamforming for Phased Array // *Proc. Asia-Pacific Microwave Conference*, 2010. P. 311–317.
33. Drummond M. V., Monteiro P. P., and Nogueira R. N. Photonic True-Time Delay Beamforming Based on Polarization-Domain Interferometers // *J. Lightwave technology*. 2010. V. 28, № 17. P. 2492–2498.
34. Burla M., Khan M. R. H., Marpaung D. A. I., Roeloffzen C. G. H., Maat P. et al. Squint-Free Beamsteering Demonstration using a Photonic Integrated Beamformer based on Optical Ring Resonators // *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics*. 2010. P. 401–404.
35. Кившарь Ю. С., Агравал Г. П. *Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов* / пер. с англ. под ред. Н. Н. Розанова. М.: Физматлит, 2005. 648 с.

Виноградова Ирина Леонидовна

д.т.н., профессор кафедры телекоммуникационных систем, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНТ, 450076, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Заки Валиди, 32), e-mail: vil-4@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-4618-6843.

Головина Евгения Юрьевна

старший преподаватель кафедры информационных технологий, Институт нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО «УГНТУ» в г. Салавате (Институт нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО «УГНТУ» в г. Салавате, 453250, Республика Башкортостан, Салават, ул. Губкина, 22Б), e-mail: egolovina82@mail.ru, ORCID ID: 0009-0006-3624-5490.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия, как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

Analysis of the Generation and Conversion Efficiency of Optical ILCF-signals on the Basis of a Classical RoF-segment Based on the Application of Two Lasers

Irina L. Vinogradova¹, Evgenia Yu. Golovina²

¹ FGBOU VO "Ufa University of Science and Technology"

² Institute of Oil Refining and Petrochemistry FSBEU VO "UGNTU" in Salavat city

Abstract: The paper proposes a method of generation and conversion of optical ILCF signals on the basis of a classical RoF-segment based on the application of two lasers. The circuit parameters of the classical RoF-segment based on the application of two independent laser sources are estimated. An approach to modeling the parameters of propagating radiation is proposed. It is found that in case of absence of signals chirping this scheme can be applied to the problems of radio frequency reception within the range up to several GHz. As the optical frequency distance of these lasers increases, the level of instability grows significantly negating the advantages of optical radio frequency generation due to increasing phase noise. Nevertheless, the range of parameters is defined (in terms of the difference in laser frequencies and the largest permissible value of ILCF) when the considered scheme provides a more or less stabilized mode of operation, and therefore it can find application in the tasks of the industrial internet.

Keywords: Radio-over-Fiber, fiber-optic transmission lines, frequency range, laser diodes, Mach-Zehnder modulator, industrial internet, Maple 12 software package, ILCF signals, chirping, phase noise.

For citation: Vinogradova I. L., Golovina E. Yu. Analysis of the generation and conversion efficiency of optical ILCF- signals on the basis of a classical RoF-segment based on the application of two lasers (in Russian). *Vestnik SibGUTI*, 2024, vol. 18, no. 3, pp. 28-44. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-3-28-44>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Vinogradova I. L., Golovina E. Yu., 2024

The article was submitted: 14.12.2023;
revised version: 31.01.2024;
accepted for publication 06.03.2024.

References

1. Vinogradova I. L., Golovina E. Yu. Ispolzovanie tehnologii Radio-over-Fiber v sistemah svyazi [Use of Radio-over-Fiber technology in communication systems]. *Collection of scientific articles on the materials of the XIII International Scientific and Practical Conference "Actual problems of science and technology"*, Ufa, 24 November, 2023, pp. 84-88.
2. Pham Van Dai. *Razrabotka modelei i metodov marshrytizacii v energoeffektivnih yacheistih setyah dal'nego radiusa deistviya* [Development of routing models and methods in energy-efficient long-range mesh networks]. Abstract of Ph. D. thesis. Saint Petersburg, 2021. 160 p.
3. Solomon Tesfay Abraha. *Impulse Radio Ultra Wideband over Fiber Techniques for Broadband In-Building Network Application*. Abstract Ph. D. thesis. Netherlands. 2012. 192p.
4. Haymen Shams. *Radio over Fiber Distribution Systems for Ultra Wideband and Millimetre wave Applications*. Abstract Ph. D. thesis. Dublin. 2011. 158p.
5. Atsushi Kanno, Pham Tien Dat, Toshiaki Kuri, Iwao Hosako, Tetsuya Kawanishi, Yuki Yoshida, and Ken'ichi Kitayama. Evaluation of frequency fluctuation in fiberwireless link with direct IQ down-converter. *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 2014, pp. 1-3.
6. U. Gliese, S. Norskov, and T. N. Nielsen. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 1996, vol. 44, no. 10, pp. 1716-1724.
7. Recommendation ITU-R SM.1045-1. Frequency tolerance of transmitters. *Electronic Publication*, 1997, 5p.
8. Orazio Svelto. *Principles of Lasers*. Springer Science & Business Media, 2010, 620 p.
9. Govind P. Agrawal. *Fiber-optic communication systems with cd*. 4th ed. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2010. 588 p.
10. Uekara N. and Ueda K. 193-mHz Beat Linewidth of Frequency Stabilized Laser-Diode-Pumped Nd:YAG Ring Lasers. *Opt. Lett*, 1 April, 1993, pp. 505-507. DOI: 10.1364/ol.18.000505.
11. Richard Scheps. *Introduction to Diode-Pumped Solid-State Lasers*. Lightwave Electronics Corp. Techn. Information, 2003. 120 p.
12. Ikegami T., Sudo S. and Sakai Y. *Frequency Stabilization of Semiconductor Laser Diodes*. Boston, Artec House, 1995. 356 p.
13. Guy M., Villeneuve B., Latrasse C. and Tétu M., Lightwave J. Simultaneous absolute frequency control of laser transmitters in both 1.3 and 1.55 μ -m bands for multiwavelength communication-systems. *Journal of lightwave technology*, 1996, pp. 1136-1143.
14. Lee Hyunjae, Lyu, G. Y., Park S. Y. and Lee J. H. Multichannel wavelength locking using transmission peaks of an AWG for multichannel optical transmission systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, vol. 10, no. 2, pp. 276-278.
15. Park Y., Lee S. T. and Chae C. J. A novel wavelength stabilization scheme using a fiber grating for WDM transmission. *IEEE Photon. Technology Letters*, 1998, vol. 10, no. 10, pp. 1446-1448.
16. Ono T. and Yano Y. Key technologies for terabit/second WDM systems with high spectral efficiency of over 1 bit/s/Hz. *IEEE J. Quantum Electron*, 1998, vol. 34, pp. 2080-2088.
17. Nasu H., Takagi T., Shinagawa T., Oike M., Nomura T. and Kasukawa A., Lightwave J. A Highly Stable and Reliable Wavelength Monitor Integrated Laser Module Design. *Journal Lightwave Technology*, 2004, vol. 22, pp. 1344-1351.
18. Nasu H., Mukaihara T., Takagi T., Oike M., Nomura T. and Kasukawa A. Wavelength monitor integrated laser modules for 25-GHz-spacing tunable applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, vol. 11, no. 1, pp. 157-164.
19. Tissot Y., Limberger H. G. and Salathe R.-P. Ultrawide bandwidth wavelength monitor based on a pair of tilted fiber Bragg gratings. *IEEE Photon. Technol. Lett*, 2007, vol. 19, pp. 1702-1704.
20. Liang W., Ilchenko V. S., Savchenkov A. A., Matsko A. B., Seidel D. and Maleki L. Whispering gallery mode resonator based ultra-narrow linewidth external cavity semiconductor laser. *Optics letters*, 2010, vol. 35, pp. 2822-2824.
21. Thorlabs. Models: EM650 High Power DFB Laser Module; SFL1550S, available at: <https://www.thorlabs.com/> (accessed: 11.09.2023)
22. Model RIO PLANEX Series 1550nm Low Phase Noise Narrow Linewidth External Cavity Laser, Redfern Integrated Optics (RIO), available at: <http://rio-lasers.com/> (accessed: 01.10.2023).
23. Consolino Luigi, Nafa Malik, Cappelli Francesco Garrasi Katia, Mezzapesa Francesco P., Li Lianhe, Davies A. Giles, Linfield Edmund H., Vitiello Miriam S., De Natale Paolo and Bartalini Saverio. Fully

- phase-stabilized quantum cascade laser frequency comb. *Electronic and Electrical Engineering*, 2018, vol. 2, no. 5, pp. 231-237.
24. Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties. *IEEE J. Quantum Electron*, 1980, pp. 347–355.
 25. Javaloyes J., Mandel P., Pieroux D. Dynamical properties of lasers coupled face to face. *Physical review. Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 2003, pp. 11.
 26. Burdin Vladimir A., Dashkov Mikhail V., Volkov Kirill A. Application of dispersion managed soliton regime in radio-over-fiber systems. *Proceedings of SPIE*, 2012, vol. 8787, pp. 1-6.
 27. Abdrakhmanova G.I., Andrianova A.V., Vinogradova I.L., Yantilina L.Z., Grahova E.P., Ishmiyarov A.A., Khasanshin V.R., Meshkov I.K., Sultanov A.Kh. Interference fiber optic device for RoF antenna radiators control. *International Siberian Conference on Control and Communications*, 2016, pp.1-6.
 28. Agrawal G. P. *Nonlinear fiber optics*. Academic Press, Boston, 2009. 466p.
 29. Chorchos Łukasz, Rommel Simon, Turkiewicz Jarosław P., Monroy Idelfonso Tafur and Olmos Juan Jos'e Vegas. *Reconfigurable Radio Access Unit for DWDM to W-Band Wireless Conversion*. *IEEE Photonics technology let*, available at: http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html/ (accessed: 08.10.2023).
 30. Meijerink Arjan, Roeloffzen Chris, Meijerink Roland, Zhuang Leimeng, Marpaung David, Bentum Mark J., Burla Maurizio, Verpoorte Jaco, Jorna Pieter, Hulzinga Adriaan and van Etten Wim. Novel Ring Resonator-Based Integrated Photonic Beamformer for Broadband Phased Array Receive Antennas - Part I: Design and Performance Analysis. *J. lightwave technology*, January 2010, vol. 28, no. 1, pp. 3–18.
 31. Leimeng Zhuang, Chris G. H. Roeloffzen, Arjan Meijerink, Maurizio Burla, David A. I. Marpaung, Arne Leinse, Marcel Hoekman, René G. Heideman, and Wim van Etten. Novel Ring Resonator-Based Integrated Photonic Beamformer for Broadband Phased Array Receive Antennas - Part II: Experimental Prototype. *Journal of lightwave technology*, January 2010, vol. 28, no. 1, pp. 19–31.
 32. Alphones Arokiaswami and Quang Thai Pham. Hybrid Approach for Optical Beamforming for Phased Array. *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference*, 2010, pp. 311–317.
 33. Drummond Miguel V., Monteiro Paulo P. and Nogueira Rogério N. Photonic True-Time Delay Beamforming Based on Polarization-Domain Interferometers. *J. Lightwave technology*, 2010, vol. 28, no. 17, pp. 2492 – 2498.
 34. Burla M., Khan M. R. H., Marpaung D. A. I., Roeloffzen C. G. H., Maat P., Dijkstra K., Leinse A., Hoekman M., Heideman R. Squint-Free Beamsteering Demonstration using a Photonic Integrated Beamformer based on Optical Ring Resonators. *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics*, 2010, pp. 401-404.
 35. Kivshar Y. S., Agrawal G. P. *Opticheskie solitoni. Ot volokonnih svetovodov do fotonnih kristallov* [Optical solitons. From fiber-optic light guides to photon crystals]. Transl. from English, ed. by N. N. Rozanov. Moscow, Fizmatlit, 2005, 648 p.

Vinogradova Irina L.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Telecommunication Systems, Ufa University of Science and Technology (UUNiT, 32, Zaki Validi St., Ufa, 450076, Republic of Bashkortostan, Ufa, 450076), e-mail: vil-4@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-4618-6843.

Golovina Evgenia Yu.

Senior Lecturer, Department of Information Technologies, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, FSBEU VO "UGNTU" in Salavat (Institute of Oil Refining and Petrochemistry FSGBOU VO "UGNTU" in Salavat, 453250, Republic of Bashkortostan, Salavat, Gubkina St., 22B), e-mail: egolovina82@mail.ru, ORCID ID: 0009-0006-3624-5490.