

Лазерные диодные модули в режиме самосинхронизации для систем оптической генерации СВЧ-сигналов

В.В. Шестак, К.Б. Микитчук, А.Л. Чиж

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси

Аннотация: в работе предлагается метод уменьшения ширины линии генерации лазерного диодного модуля для систем оптической генерации СВЧ-сигналов, основанный на использовании режима оптической самосинхронизации. Предлагаемый метод реализован в лазерном диодном модуле с помощью отражения и задержки малой доли излучения обратно в резонатор лазерного диода на основе волоконно-оптического разветвителя и отрезка одномодового оптического волокна с зеркалом Фарадея. Показано, что при определенных параметрах режима оптической самосинхронизации возможно сужение линии генерации лазерного диода до единиц килогерц при одновременной высокой временной стабильности ширины линии.

Ключевые слова: оптическая самосинхронизация, ширина линии генерации, лазерный диод, радиофотоника.

1. Введение

Использование сверхширокополосных СВЧ-сигналов значительно расширяет возможности систем радиолокации и измерительной СВЧ-техники, однако обладает высокой технической сложностью, обусловленной узкополосностью активных электронных СВЧ-устройств [1]. Подходы радиофотоники позволяют реализовать системы генерации, передачи и обработки сверхширокополосных СВЧ-сигналов на иных принципах: из-за огромной разницы между временными/частотными масштабами оптической несущей (~200 ТГц) и частоты генерируемого или обрабатываемого СВЧ-сигнала (~1÷100 ГГц) в радиофотонных устройствах любой модулированный оптический сигнал является узкополосным с точки зрения оптической системы [1,2]. Одним из наиболее гибких методов генерации СВЧ-сигналов является оптическое гетеродинирование излучения двух лазерных диодов, когда реализуется детектирование оптических несущих с различными длинами волн с помощью СВЧ-фотодетектора, при этом на выходе фотодетектора генерируется СВЧ-сигнал на разностной частоте между оптическими несущими. Управление частотой генерации лазерных диодов достигается с помощью контроля тока накачки и / или температуры чипа лазера [2,3].

При оптической генерации СВЧ-сигнала на основе гетеродинирования излучения двух лазеров предельная частота генерации ограничена только предельной частотой СВЧ-фотодетектора, которая может достигать нескольких сотен гигагерц. Однако, из-за того, что оптические несущие, получаемые от двух независимых лазерных диодов в режиме свободной генерации, некогерентны, формируется СВЧ-сигнал с достаточно высоким фазовым шумом, который определяется шириной линии генерации используемых в системе гетеродинирования лазерных диодов. Для лазерных диодов с распределенной обратной связью, используемых в системах радиофотоники, типично ширина линии генерации превышает 100 кГц из-за малой длины оптического резонатора, поэтому уменьшение ширины линии генерации лазерных диодов является весьма актуальной задачей для создания систем оптической генерации СВЧ-сигналов.

При использовании оптической обратной связи в лазерных диодных модулях, в общем случае, возможны различные режимы работы: оптическая самосинхронизация, оптическая бистабильность, автопульсации, оптический хаос [4]. Потенциально одним из методов по уменьшению ширины линии генерации лазерного диода является оптическая самосинхронизация [5], которая достигается с помощью отражения малой доли излучения обратно в резонатор лазерного диода с задержкой на время, существенно большее, чем время жизни фотонов в лазерном резонаторе. В других случаях оптической обратной связи динамика генерации оказывается нестабильной во времени [6]. В данной работе исследуется режим оптической самосинхронизации лазерного диода с распределенной обратной связью, обеспечивающий стационарное уменьшение спектральной ширины линии генерации.

2. Лазерный диодный модуль с оптической самосинхронизацией

На рисунке 1 приведена фотография и блок-схема лазерного диодного модуля, в котором обеспечивается режим оптической самосинхронизации лазерного диода. В модуле небольшая доля k от 0.1 до 10% излучения от термостабилизированного лазерного диода с распределенной обратной связью направляется с помощью волоконно-оптического разветвителя в отрезок оптического волокна с длиной L , обеспечивающий возвращение части излучения в резонатор лазера с временной задержкой $\tau = 2n_f L / c$, где n_f – эффективный показатель преломления сердцевины оптического волокна, c – скорость света. На выходе отрезка оптического волокна обратное отражение лазерного излучения реализуется с помощью зеркала Фарадея, использование которого обеспечивает согласование состояния поляризации отраженного излучения с исходным на выходе лазерного резонатора.

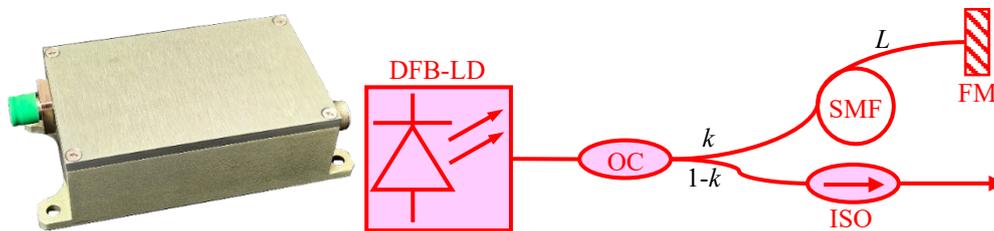


Рисунок 1. Фотография и блок-схема лазерного диодного модуля с габаритными размерами $107 \times 54 \times 31$ мм³, в котором обеспечивается режим оптической самосинхронизации лазерного диода: DFB-LD лазерный диод с распределенной обратной связью, OC – оптический разветвитель с коэффициентом ответвления k , SMF – отрезок одномодового оптического волокна длиной L , FM – зеркало Фарадея, ISO – оптический изолятор.

Главными параметрами, определяющими ширину линии генерации лазерного диода в режиме оптической самосинхронизации, являются длительность задержки в петле оптической обратной связи и коэффициент самоинжекции. Данная конструкция позволяет реализовать большой диапазон длительностей задержки в петле оптической обратной связи от 1 до 500 нс (ограничена габаритами модуля), а также коэффициента самоинжекции от -60 до -20 дБ, который определяется отношением мощности лазерного излучения, инжектируемого в лазерный резонатор, к выходной мощности генерации лазерного диода и равняется $\eta = \rho \alpha^2 k^2$, где ρ – коэффициент отражения от зеркала Фарадея, α – оптические потери в отрезке оптического волокна. Для работы модуля необходимо двухполярное напряжение питания ± 6 В, при этом для обеспечения широкого рабочего температурного диапазона от -50 до $+50^\circ\text{C}$ максимальный ток потребления составляет 500 мА. Лазерный диодный модуль имеет выходной оптический разъем FC/APC и генерирует излучение на длине волны около 1550 нм с мощностью порядка 10 мВт.

3. Ширина линии генерации лазерного диода с оптической самосинхронизацией

Измерение ширины линии генерации лазерного диодного модуля проводилось с помощью метода гомодинирования на основе интерферометра Майкельсона [7,8], блок-схема которого изображена на рисунке 2. Оптический сигнал с лазерного диодного модуля подавался на оптический изолятор с высоким коэффициентом изоляции свыше 80 дБ, что обеспечивает подавление паразитных обратных отражений от оптических элементов интерферометра Майкельсона. Далее излучение направлялось на вход волоконно-оптического интерферометра Майкельсона, образованного оптическим разветвителем 2×2 с коэффициентом деления 10% / 90%. Для подавления влияния рассеяния Манделъштама-Бриллюэна на большее плечо интерферометра, образованное волоконно-оптической катушкой длиной 50 км, подавалась меньшая часть оптического излучения [9]. Разность длительностей задержки в плечах интерферометра Майкельсона в эксперименте составила 500 мкс, что позволяет измерять спектральную ширину линии генерации менее 1 кГц. Для обеспечения согласованности состояний поляризации излучения в интерферометре Майкельсона использовались зеркала Фарадея.

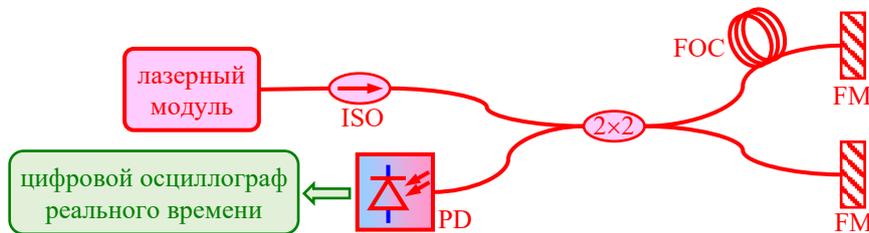


Рисунок 2. Схема измерения ширины линии генерации лазерного модуля методом гомодинирования на основе интерферометра Майкельсона: ISO – волоконно-оптический изолятор, 2x2 – волоконно-оптические разветвитель, PD – фотодиод, FOC – волоконно-оптическая катушка, FM – зеркало Фарадея.

На рисунке 3 приведены контуры линий генерации лазерного диода в режиме оптической самосинхронизации для различных коэффициентов самоинжекции и длительностей задержки в петле оптической обратной связи. Форма контуров генерации соответствует линии Фойгта, то есть представляет собой свертку линии Лоренца (обусловлена временем жизни фотонов в резонаторе) и линии Гаусса (обусловлена нестабильностями тока накачки, остаточными флуктуациями температуры из-за неидеальности системы термостабилизации, то есть внешними воздействиями на лазерный диодный модуль). Из рисунков видно, что увеличение коэффициента самоинжекции и длительности задержки приводит к уменьшению ширины линии генерации лазерного диода. Следует отметить, что именно лоренцевская составляющая контура Фойгта характеризует само лазерное излучение без учета целого комплекса случайных внешних факторов, суммарное воздействие которых по центральной предельной теореме и приводит к гауссовскому уширению. Для оценки ширины лоренцевской составляющей линии генерации лазерного модуля измерялась ширина экспериментальных контуров по уровню –20 дБ, а затем полученные величины пересчитывались к общепринятому значению ширины для контура Лоренца по уровню –3 дБ [4]. На рисунке 4 показаны зависимости ширины лоренцевской составляющей линии генерации от коэффициента самоинжекции и длительности задержки в петле оптической обратной связи. Из рисунков видно, что использование оптической самосинхронизации с длительностью задержки в петле оптической обратной связи 41 нс и коэффициентом самоинжекции –40 дБ приводит к уменьшению исходной ширины линии 80 кГц в 2 раза до 40 кГц. Увеличение коэффициента самоинжекции с –40 до –26 дБ приводит к еще большему уменьшению

ширины лоренцевской составляющей линии генерации лазерного диодного модуля до 8.7 кГц. Для дальнейшего сужения линии генерации необходимо увеличивать длительность задержки в петле оптической обратной связи. Так, увеличение задержки с 41 до 74 нс приводит к дополнительному уменьшению ширины лоренцевской составляющей линии генерации до 5.1 кГц.

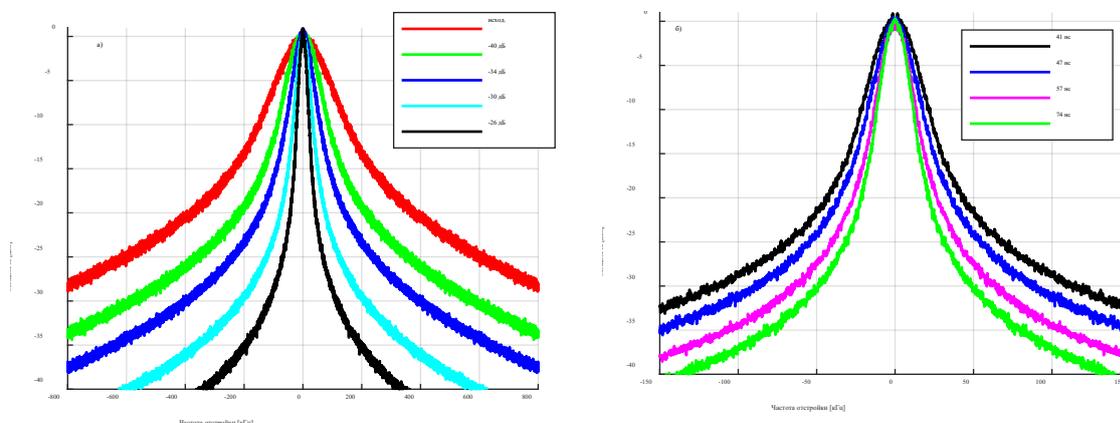


Рисунок 3. Контуры линий генерации лазерного диода в режиме оптической самосинхронизации: а) для различных коэффициентов самоинжекции при длительности задержки в петле обратной оптической связи 41 нс; б) для различных длительностей задержки в петле обратной оптической связи при коэффициенте самоинжекции -26 дБ

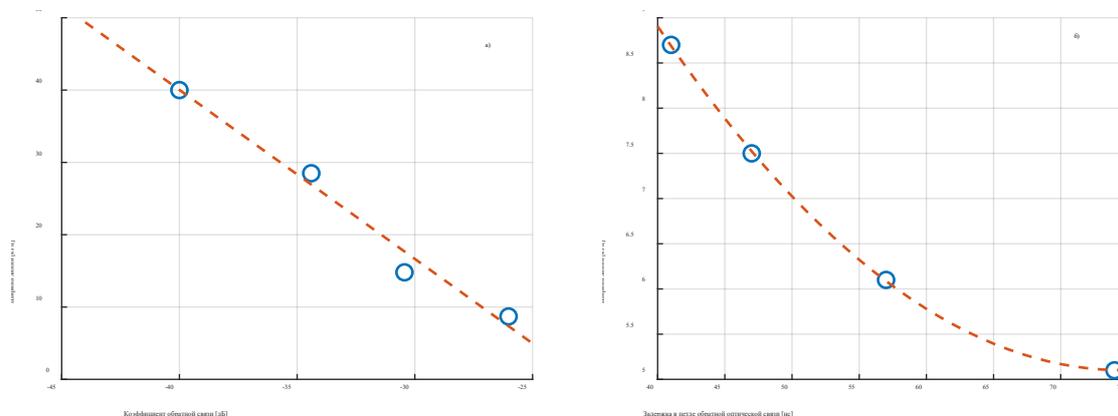


Рисунок 4. Зависимость ширины лоренцевской составляющей линии генерации: а) от коэффициента самоинжекции при задержке в петле обратной оптической связи 41 нс; б) от задержки в петле обратной оптической связи при коэффициенте самоинжекции -26 дБ.

Для исследования временной стабильности ширины лоренцевской составляющей линии генерации через равные промежутки времени на протяжении более 10 часов проводилось свыше 1000 измерений. На рисунке 5 приведена стабильность ширины лоренцевской составляющей линии генерации лазерного диода в режиме оптической самосинхронизации при коэффициенте самоинжекции -26 дБ и различных длительностях задержки в петле оптической обратной связи 41 и 74 нс. Видно, что ширина лоренцевской составляющей линии генерации находится в диапазонах 8.7 ± 3.4 кГц и 5.1 ± 2.9 кГц для задержек 41 и 74 нс, соответственно. При увеличении длительности задержки в петле оптической обратной связи гистограмма распределения ширины линии генерации перестает быть симметричной, но разброс значений ширины линии генерации уменьшается. Следует отметить, что спектр

генерации лазерного диодного модуля не изменяется при использовании режима оптической самосинхронизации, то есть сохраняются стабильный одномодовый режим генерации и коэффициент подавления побочных мод, равный 60 дБ.

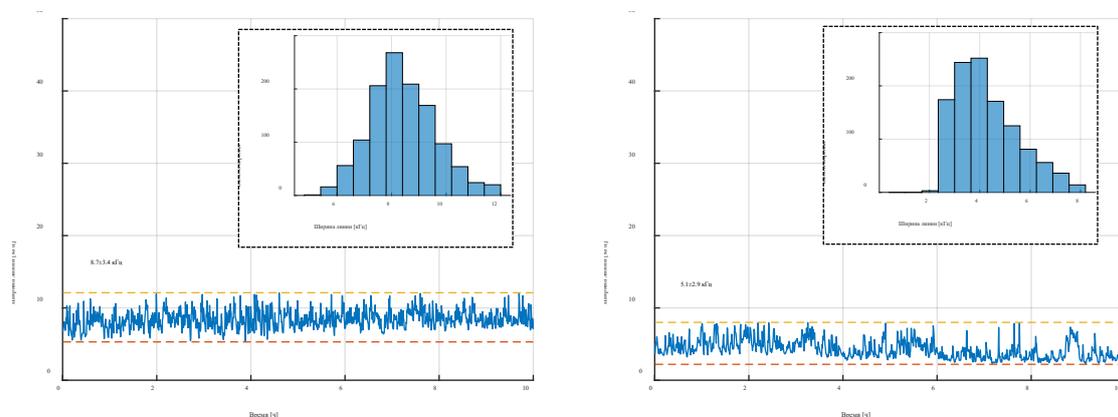


Рисунок 5. Стабильность ширины лоренцевской составляющей линии генерации лазерного диода в режиме оптической самосинхронизации для коэффициента самоинжекции -26 дБ и длительности задержки в петле оптической обратной связи: 41 нс (слева) и 74 нс (справа). На вставках – гистограммы распределения величины ширины линии генерации

4. Заключение

Показано, что использование режима оптической самосинхронизации лазерного диода позволяет уменьшить ширину линии генерации более чем на порядок с 80 до 5.1 кГц. Предложенный метод уменьшения ширины линии генерации реализован в лазерном диодном модуле с малыми габаритными размерами и электропотреблением. Установлено, что увеличение коэффициента самоинжекции до -26 дБ при одновременном увеличении длительности задержки в петле оптической обратной связи до 74 нс приводит к уменьшению ширины лоренцевской составляющей линии генерации до 5.1 кГц, при этом за время более 10 часов ширина лоренцевской составляющей линии генерации оставалась в диапазоне 5.1 ± 2.9 кГц. Это позволяет использовать лазерные диодные модули в режиме самосинхронизации для систем оптической генерации СВЧ-сигналов, основанных на гетеродинировании оптических сигналов. Дальнейшее продолжение работы будет сосредоточено на получении ширины лоренцевской составляющей линии генерации менее 1 кГц.

Список литературы

1. Chang W. (ed.) RF photonic technology in optical fiber links. – Cambridge University Press, 2002.
2. Thach R. Phase noise and linewidth in an InGaAsP DFB laser // Journal of Lightwave Technology. – 1986. – Vol. 4. – № 11. – P. 1711-1716.
3. Faugeron M. et al. High-power, low RIN 1.55- μ m directly modulated DFB lasers for analog signal transmission // IEEE Photonics Technology Letters. – 2012. – Vol. 24. – № 2. – P. 116-118.
4. Ohtsubo J. Semiconductor lasers stability, instability and chaos. – Springer, 2017.
5. Lang R. et al. External optical feedback effects on semiconductor injection properties // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1980. – Vol. 16. – № 3. – P. 347-355.
6. Lenstra L. et al. Coherence collapse in single-mode semiconductor lasers due to optical feedback // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1985. – Vol. 21. – № 6. – P. 674-679.
7. Prasad S. et al. High-speed electronics and optoelectronics: devices and circuits. – Cambridge University Press, 2009.
8. Linden B. $1/f$ frequency noise effects on self-heterodyne linewidth measurements // Journal of Lightwave Technology. – 1991. – Vol. 9. – № 4. – P. 485-483.
9. Coldren L. Diode lasers and photonic integrated circuits. – Wiley & Sons, 2012.