

Оптоэлектронный гетеродин X-диапазона со сверхнизким фазовым шумом

К.Б. Микитчук¹, А.Л. Чиж¹, И.В. Скоторенко², Е.В. Григорьев², Ю.А. Светличный², А.В. Сычева²

¹ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси

²ООО «ЛЭМЗ-Т»

Аннотация: в работе представлены результаты исследования характеристик оптоэлектронного генератора в режиме свободной генерации, предложен способ синхронизации оптоэлектронного генератора с сигналом высокостабильного кварцевого генератора при помощи узкополосной петли фазовой автоподстройки частоты, а также приведены результаты экспериментального исследования стабильности частоты макета оптоэлектронного СВЧ-гетеродина.

Ключевые слова: оптоэлектронный генератор СВЧ, оптоэлектронный СВЧ-гетеродин, фазовый шум, волоконно-оптическая линия задержки, оптический усилитель на легированном эрбием волокне

1. Введение

В современных радиолокационных станциях выдвигаются достаточно жесткие требования как к кратковременной, так и к долговременной стабильности частоты гетеродина. Необходимость обеспечения кратковременной стабильности частоты обусловлена исключительно малой эффективной поверхностью рассеяния целей, составляющей менее 0.1 м^2 [1]. Требования к долговременной стабильности частоты, в свою очередь, следуют из необходимости обеспечения возможности накопления и корреляционной обработки сигналов в приемных трактах радиолокационных станций, а также обеспечения безусловного захвата частоты гетеродина системами частотного синтеза. Кратковременная стабильность частоты генераторов СВЧ характеризуется спектральной плотностью мощности фазового шума. Обычно сигналы с низким фазовым шумом генерируются с помощью электронных схем, содержащих в контуре положительной обратной связи высокочастотные электромагнитные, магнитоэлектрические или акустоэлектрические резонаторы. В X-диапазоне добротность практически всех СВЧ-резонаторов значительно уменьшается по сравнению с более низкими частотами, что приводит к ограничению максимальной частоты прямой генерации [2]. Альтернативным способом генерации синусоидальных СВЧ-сигналов с низким фазовым шумом являются оптоэлектронные генераторы СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением, которые по принципу своей работы относятся к автогенераторам с положительной обратной связью, реализованной на основе волоконно-оптической линии задержки [2]. Возможность генерации гармонического СВЧ-сигнала со сверхнизким фазовым шумом в таких генераторах обусловлена тем, что длительность задержки в волоконно-оптической линии может достигать 100 мкс, что эквивалентно добротности свыше 10^6 для X-диапазона частот. В частности, оптоэлектронные генераторы СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением обеспечивают генерацию сигналов с фазовым шумом менее -140 дБн/Гц на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ-несущей 10 ГГц [3].

Основной недостаток оптоэлектронных генераторов СВЧ, ограничивающий их применение в системах радиолокации в качестве гетеродина, – это большая долговременная нестабильность их частоты по отношению к изменениям температуры. Температурный коэффициент частоты оптоэлектронного генератора определяется температурным коэффициентом длительности задержки в оптическом

волокне и составляет величину порядка $-12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [3]. В современных системах радиолокации по меньшей мере требуется величина температурной нестабильности не более $\pm 10^{-6}$ в рабочем диапазоне температур, который может составлять от минус 50°C до $+50^{\circ}\text{C}$ при наружном размещении аппаратуры.

В работе представлены результаты исследования характеристик оптоэлектронного генератора в режиме свободной генерации, предложен способ синхронизации оптоэлектронного генератора с сигналом высокостабильного кварцевого генератора при помощи узкополосной петли фазовой автоподстройки частоты, а также приведены результаты экспериментального исследования нестабильности частоты созданного макета оптоэлектронного СВЧ-гетеродина.

2. Оптоэлектронный генератор СВЧ в режиме свободной генерации

Возможность генерации СВЧ-сигналов со сверхнизким фазовым шумом в оптоэлектронных генераторах обусловлена возможностью использования оптического усиления со сверхнизким собственным фазовым шумом, а также большой эквивалентной добротностью волоконно-оптической линии задержки. Следует отметить, что конструкцию оптического усилителя на легированном эрбием волокне можно оптимизировать для получения наиболее низкого шума (менее -150 дБн/Гц) в режиме насыщения при входной мощности оптической несущей более -10 дБм, что является типичным для оптоэлектронных генераторов СВЧ на линиях задержки, при этом возможно достичь величины эквивалентного коэффициента усиления СВЧ-сигнала свыше 30 дБ [4]. На рисунке 1 представлена схема и фотография модуля двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением.

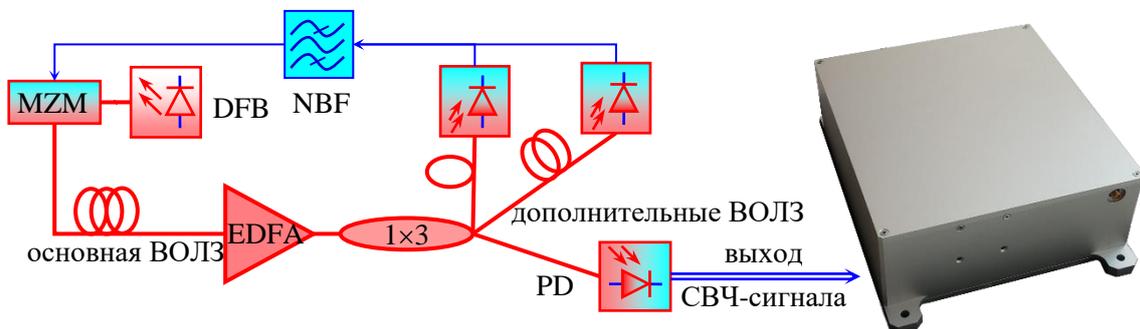


Рисунок 1. Схема и фотография двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением: DFB – лазерный диод с распределенной обратной связью, MZM – электрооптический модулятор Маха-Цендера, NBF – узкополосный СВЧ-фильтр, PD – мощный СВЧ-фотодиод, ВОЛЗ – волоконно-оптическая линия задержки

Электрооптическое преобразование в оптоэлектронном генераторе осуществляется путем модуляции по интенсивности излучения лазерного диода с распределенной обратной связью электрооптическим модулятором Маха-Цендера. Задержка оптического сигнала осуществляется в основной волоконно-оптической линии, представляющей собой волоконно-оптическую катушку из одномодового кварцевого оптического волокна длиной несколько километров. Оптический усилитель на легированном эрбием волокне используется для компенсации потерь, возникающих в контуре оптоэлектронного генератора. На выходе оптического усилителя с помощью волоконно-оптического разветвителя включены дополнительные волоконно-оптические линии задержки, необходимые для увеличения частотной селективности контура оптоэлектронного генератора, что позволяет значительно снизить уровень дискретных составляющих в спектре генерации [3]. Оптоэлектронное преобразование модулированного по интенсивности

оптического сигнала в СВЧ-сигнал осуществляется с помощью мощного СВЧ-фотодиода Шоттки [4]. В качестве узкополосного СВЧ-фильтра используется фильтр первого порядка на основе полого металлического резонатора. Габаритные размеры модуля двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ с частотой генерации 10 ГГц составляют $257 \times 197 \times 84$ мм, а вес – менее 3 кг.

Для измерения сверхнизкой спектральной плотности мощности фазового шума двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ использовался анализатор источников сигналов Rohde&Schwarz FSWP26, в основе работы которого лежит принцип выделения квадратурных компонентов с одновременным понижением частоты и математической обработкой синфазных и квадратурных компонент сигнала, а также кросскорреляционная обработка результатов 300 отдельных измерений. На рисунке 2 приведен фазовый и амплитудный шум двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц. Из рисунка видно, что фазовый шум на отстройке 10 кГц от СВЧ-несущей равен -142 дБн/Гц, при этом спектральная плотность мощности дискретных составляющих в спектре генерации не превышает -120 дБн/Гц (соответствует мощности не более -91 дБн в полосе анализа 1 кГц). Видно, что во всем диапазоне отстроек от СВЧ-несущей амплитудный шум оказывается меньше фазового шума, причем для отстроек от СВЧ-несущей от 1 кГц до 1 МГц спектральная плотность мощности амплитудного шума не превышает -130 дБн/Гц. Минимальный уровень спектральных составляющих в спектре («шумовая полка») составляет величину порядка -150 дБн/Гц.

Разработанный двухконтурный оптоэлектронный генератор СВЧ с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц одновременно обеспечивает и сверхнизкий фазовый шум менее -142 дБн/Гц на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ-несущей, и низкий уровень дискретных составляющих в спектре генерации, который не превышает -91 дБн. Однако, при изменении температуры окружающей среды от $+5^\circ\text{C}$ до $+40^\circ\text{C}$ частота генерации изменяется в диапазоне $10.04 \text{ ГГц} \pm 1.757 \text{ МГц}$. Следует отметить, что мощность генерации во всем диапазоне температур изменялась не более, чем на 3.4 дБ.

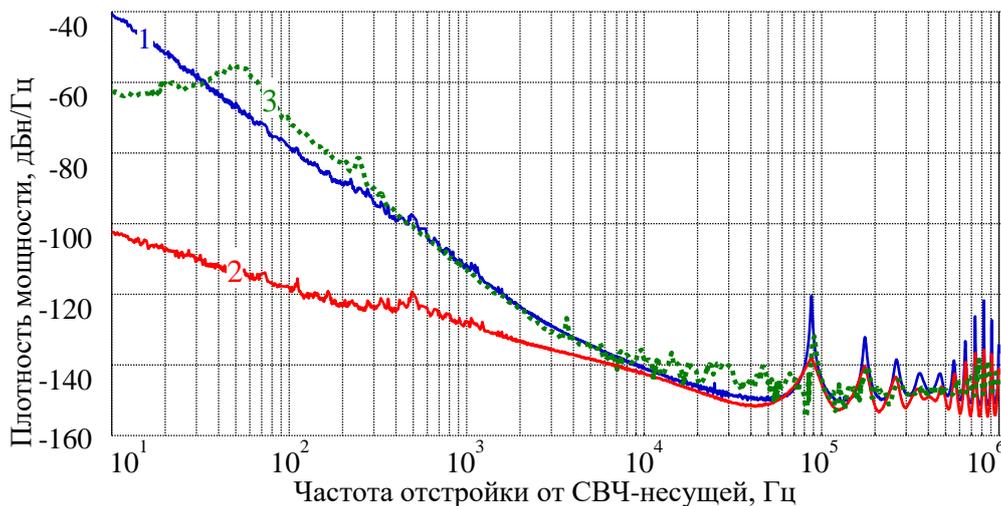


Рисунок 2. Фазовый (1) и амплитудный (2) шум двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц (измеренные с помощью анализатора источников сигналов Rohde&Schwarz FSWP26), и фазовый шум (3) оптоэлектронного гетеродина (измеренный с помощью анализатора источников сигналов Agilent E5052B)

3. Стабилизация частоты гетеродина на основе оптоэлектронного генератора

Оптоэлектронные генераторы являются автогенераторами на линиях задержки, поэтому они обладают дискретным набором собственных частот, спектральное положение которых определяется длительностью задержки, которая, в свою очередь, зависит от температуры окружающей среды. При перестройке частоты между собственными частотами при изменении температуры оптоэлектронного генератора не происходит срыва или замирания генерации СВЧ-сигнала, а также не снижается спектральная частота генерируемого сигнала [3]. Это позволяет использовать систему с фазовой автоподстройкой частоты для стабилизации частоты оптоэлектронного генератора в режиме свободной генерации. Рисунок 4 показывает схему оптоэлектронного гетеродина на основе оптоэлектронного генератора с устройством для стабилизации частоты с фазовой автоподстройкой. Важно, что система фазовой автоподстройки частоты выполняет функцию стабилизации разности частот оптоэлектронного генератора, который работает в режиме свободной генерации (частота генерации изменяется в ограниченном диапазоне, определяемом температурным диапазоном), и частоты высокочастотного (ВЧ) генератора, управляемого напряжением, путем сравнения с частотой высокостабильного кварцевого генератора в частотно-фазовом детекторе (в макете гетеродина использовался высокостабильный кварцевый генератор с относительным значением температурной нестабильности $3 \cdot 10^{-9}$ в диапазоне температур от минус 40°C до $+70^\circ\text{C}$). Данный метод стабилизации частоты (*heterodyne phase locking* [5]) позволяет стабилизировать выходную частоту гетеродина без использования непосредственных воздействий на параметры задающего генератора, который остается в режиме свободной генерации, при этом отсутствует необходимость обеспечения сверхнизкого уровня собственных шумов системы фазовой автоподстройки частоты [5,6].

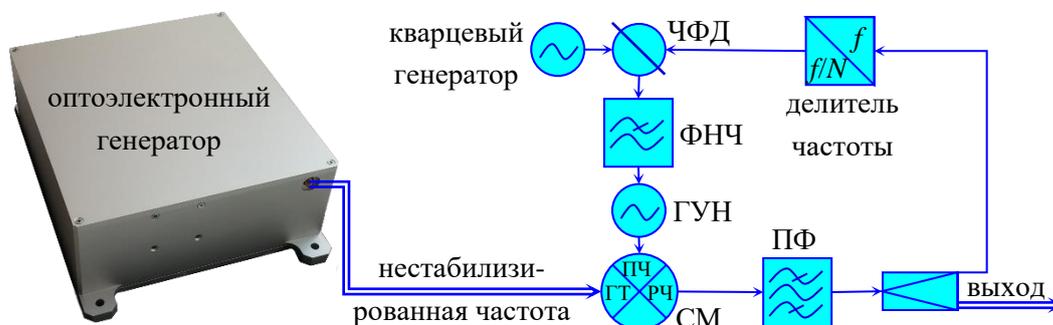


Рисунок 3. Схема оптоэлектронного гетеродина на основе оптоэлектронного генератора с устройством для стабилизации частоты с фазовой автоподстройкой, где СМ – радиочастотный смеситель, ПФ – полосу-пропускающий фильтр, ЧФД – частотно-фазовый детектор, ФНЧ – петлевой фильтр нижних частот, ГУН – управляемый напряжением генератор

На рисунке 2 (кривая 3) представлен фазовый шум оптоэлектронного гетеродина, измеренный с помощью анализатора источников сигналов Agilent E5052B. Из рисунка видно, что для частот отстройки свыше 300 Гц фазовый шум оптоэлектронного гетеродина со стабилизированной частотой совпадает с фазовым шумом оптоэлектронного генератора в режиме свободной генерации. Следует отметить, что на частотах отстройки от СВЧ-несущей свыше 10^4 Гц спектр искажен собственным шумом анализатора источников сигналов Agilent E5052B. На рисунке 4 приведен спектр сигнала оптоэлектронного гетеродина, измеренный с помощью анализатора источников сигналов Rohde&Schwarz FSW26. Из рисунка видно, что уровень мощности дискретных составляющих в спектре не превышает -90 дБн (спектр генерации вблизи СВЧ-несущей при отстройках от СВЧ-несущей менее 0.5 МГц

искажен собственным шумом анализатора спектра), что соответствует уровню для оптоэлектронного генератора в режиме свободной генерации.

Исследование стабильности частоты оптоэлектронного гетеродина проводилось в камере тепла-холода в диапазоне температур от +5 до +40°C. Во всем исследованном диапазоне температур уход частоты генерации частоты гетеродина не превысил 11 Гц, то есть относительная нестабильность частоты по меньшей мере не превысила $3 \cdot 10^{-9}$. Температурный коэффициент частоты оптоэлектронного гетеродина с предложенной архитектурой системы стабилизации частоты определяется температурной нестабильностью используемого высокостабильного кварцевого ВЧ-генератора, при этом сохраняется высокая спектральная чистота выходного сигнала.

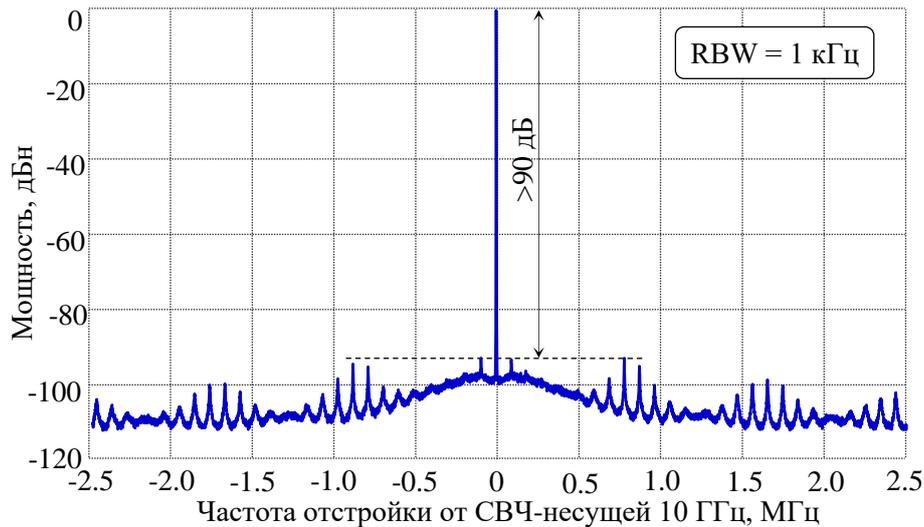


Рисунок 4. Спектр сигнала оптоэлектронного гетеродина, измеренный с помощью анализатора источников сигналов Rohde&Schwarz FSW26

3. Заключение

Температурный коэффициент частоты оптоэлектронного гетеродина, в котором система фазовой автоподстройки частоты выполняет функцию стабилизации разности частот оптоэлектронного генератора X-диапазона частот в режиме свободной генерации и частоты ВЧ-генератора, управляемого напряжением, определяется температурной нестабильностью используемого кварцевого опорного генератора.

Список литературы

1. Обнаружение и распознавание объектов радиолокации / А. В. Соколов [ред.]. – М.: «Радиотехника», 2006. – 176 с.
2. Fundamentals of microwave photonics / V.J.Urick, K.J.Williams, J.D. McKinney // Wiley, 2015. – 488 p.
3. K. Mikitchuk, A. Chizh and S. Malyshev, “Modeling and Design of Optoelectronic Oscillators,” IEEE J. of Quant. Electronics, vol. 52, no. 10, pp. 1-8, Oct. 2016.
4. Микитчук, К.Б. Двухконтурный оптоэлектронный генератор СВЧ с низким уровнем дискретных составляющих в спектре генерации и сверхнизким фазовым шумом / К.Б. Микитчук, А.Л. Чиж, С.А. Малышев // Сб. ст. 7-ой Всеросс. науч. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – С.-Петербург, Россия. – 28-30 мая 2018. – С. 296-301.
5. B. Razavi, Heterodyne phase locking: a technique for high-speed frequency division / B. Razavi // IEEE J. of solid-state circuits. – V. 42, №12. –2007. – P. 2887–2892.
6. Yanhong Zhu, A novel scheme of microwave generation based on heterodyne phase locking of an OEO / Yanhong Zhu [et al.] // IEEE Phot. technol. let. – Vol. 28, № 22. – 2016. – P. 2637–2640.