

ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ И ДРУГИЕ ВОПРОСЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**Оптоэлектронный опорный генератор X-диапазона частот для радиолокационных систем****А.Л.Чиж, К.Б.Микитчук, И.В.Скаторенко**

Представлены конструкция и результаты исследования характеристик оптоэлектронного генератора сверхвысокой частоты (СВЧ) в режиме свободной генерации, предложен способ его синхронизации с сигналом высокостабильного кварцевого генератора при помощи петли фазовой автоподстройки частоты, а также приведены результаты экспериментального исследования неустойчивости частоты оптоэлектронного опорного генератора СВЧ. Рассматриваемый оптоэлектронный опорный генератор СВЧ с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц одновременно обеспечивает сверхнизкий фазовый шум (менее –142 дБн/Гц) на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ несущей и низкий уровень дискретных составляющих в спектре генерации (не более –94 дБн). При этом температурный коэффициент частоты генерации определяется температурной неустойчивостью высокостабильного кварцевого генератора.

Ключевые слова: оптоэлектронный генератор СВЧ, опорный генератор, фазовый шум, фазовая автоподстройка частоты.

1. Введение

Автогенераторы сверхвысокой частоты (СВЧ) с низким уровнем фазового шума имеют большое значение для многих коммерческих и специальных применений, таких как беспроводные и оптические системы связи, системы радиолокации и измерительной СВЧ-техники. Пределы измерений анализаторов спектра определяются фазовым шумом опорного генератора, а в современных радиолокационных станциях выдвигаются достаточно жесткие требования как к кратковременной, так и к долговременной стабильности частоты опорного генератора. Например, необходимость обеспечения кратковременной стабильности частоты в доплеровских радарх обусловлена малой эффективной поверхностью рассеяния целей [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 безусловного захвата частоты опорного генератора системами частотного синтеза.

Кратковременная стабильность частоты генераторов характеризуется спектральной плотностью мощности фазового шума. Обычно сигналы с низким фазовым шумом генерируются с помощью электронных схем, содержащих в контуре положительной обратной связи высокодобротные электромагнитные, магнитоэлектрические или акустоэлектрические резонаторы. В X-диапазоне частот добротность практически всех СВЧ-резонаторов значительно

но уменьшается по сравнению с добротностью в диапазоне более низких частот, что приводит к увеличению фазового шума, уровень которого и ограничивает максимальную частоту генерации [2, 3]. Альтернативным способом генерации синусоидальных СВЧ-сигналов с низким фазовым шумом является применение волоконно-оптических линий задержки (ВОЛЗ) в оптоэлектронных генераторах СВЧ, которые по принципу своей работы относятся к автогенераторам с положительной обратной связью [3, 4]. Сверхнизкий фазовый шум в таких генераторах обусловлен большой эквивалентной добротностью ВОЛЗ в СВЧ-диапазоне, а также возможностью использования вместо транзисторных усилителей оптических усилителей со сверхнизким собственным фазовым шумом. Усилители на основе легированного эрбием волокна в режиме насыщения при входной мощности оптической несущей свыше 1 мВт позволяют достичь уровня собственного шума менее –150 дБн/Гц (децибел от несущей на герц), при этом эквивалентный коэффициент усиления СВЧ-сигнала может составлять более 30 дБ [5, 6]. Оптоэлектронные генераторы СВЧ для X-диапазона на основе линий задержки с оптическим усилением обеспечивают генерацию сигналов с фазовым шумом менее –140 дБн/Гц на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ несущей [4, 7].

Основной недостаток оптоэлектронных генераторов СВЧ, ограничивающий их применение в системах связи, радиолокации и измерительной СВЧ-техники в качестве опорного генератора, – это недостаточная долговременная стабильность частоты генерации по отношению к изменениям температуры окружающей среды. Температурный коэффициент частоты оптоэлектронного генератора определяется температурным коэффициентом времени задержки сигнала в оптическом волокне, который для кварцевого одномодового оптического волокна составляет от $-0.7 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ до $-1.4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [8, 9]. В современных системах радиолокации, например, требуется температурная неустойчивость не более $\pm 10^{-6}$ в рабочем диапазоне температур от $-50 \text{ } ^\circ\text{C}$ до $+50 \text{ } ^\circ\text{C}$, что эквивалентно температурному коэффициенту частоты менее $\pm 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

А.Л.Чиж, К.Б.Микитчук. Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАНБ, Беларусь, 220072 Минск, просп. Независимости, 68; e-mail: chizh@oelt.basnet.by
И.В.Скаторенко. ООО «ЛЭМЗ-Т», Россия, 634055 Томск, просп. Развития, 8

Поступила в редакцию 10 сентября 2020 г., после доработки – 25 ноября 2020 г.

В настоящей работе представлены конструкция и результаты исследования характеристик оптоэлектронного генератора СВЧ в режиме свободной генерации, предложен способ синхронизации оптоэлектронного генератора с сигналом высокостабильного кварцевого генератора при помощи петли фазовой автоподстройки частоты, а также приведены результаты экспериментального исследования нестабильности частоты оптоэлектронного опорного генератора СВЧ.

2. Конструкция оптоэлектронного генератора

На рис.1 показана структурная схема оптоэлектронного генератора СВЧ с оптическим усилением. Электро-оптическое преобразование в оптоэлектронном генераторе выполняется путем модуляции интенсивности излучения лазерного диода с распределенной обратной связью и выходной мощностью 20 мВт (длина волны генерации 1550 нм, ширина линии генерации ~300 кГц) электрооптическим модулятором Маха–Цендера с полуволновым напряжением 6 В на частоте 10 ГГц. Задержка оптического сигнала осуществляется в основной ВОЛЗ, представляющей собой волоконно-оптическую катушку из одномодового оптического волокна из кварцевого стекла длиной 2 км, что обеспечивает время задержки ~10 мкс. Оптический усилитель на основе легированного эрбием волокна применяется для компенсации потерь, возникающих в контуре оптоэлектронного генератора. На выходе оптического усилителя с помощью волоконно-оптического разветвителя 1 × 3 включены дополнительные ВОЛЗ с разностью времен задержки сигнала в контуре генератора 1.2 мкс, необходимые для увеличения частотной селективности контура оптоэлектронного генератора и позволяющие значительно снизить уровень дискретных составляющих в спектре генерации [7]. Оптоэлектронное преобразование модулированного по интенсивности оптического сигнала в СВЧ-сигнал в контуре оптоэлектронного генератора выполняется с помощью мощных рип-фотодиодов из InGaAs с СВЧ-сумматором. В качестве узкополосного СВЧ-фильтра используется фильтр первого порядка на основе полого металлического резонатора с шириной полосы пропускания 10 МГц. Выход

сигнала генерации осуществляется с помощью мощного рип-фотодиода из InGaAs непосредственно из ВОЛЗ, что дает возможность реализовать полную гальваническую развязку СВЧ-выхода генератора. Данная конструкция имеет следующие преимущества перед традиционной конструкцией с несколькими петлями обратной связи:

- эквивалентные фазовые шумы волоконно-оптического усилителя значительно ниже фазовых шумов электронных СВЧ-усилителей, что позволяет уменьшить фазовый шум на частотных отстройках вблизи СВЧ несущей по сравнению с оптоэлектронным генератором с полностью электронным усилением [8, 9];

- выходной сигнал генерации выводится с помощью волоконно-оптического разветвителя и мощного СВЧ-фотодиода, обеспечивающих полную гальваническую развязку с внешней нагрузкой, а также возможность реализации оптоэлектронного генератора со множеством идентичных выходов.

Теоретическое исследование рассматриваемого оптоэлектронного генератора проводится с использованием нелинейной нестационарной модели, в рамках которой описываются однонаправленные обходы замкнутой активной петли положительной обратной связи одним отсчетом комплексной медленно меняющейся амплитуды СВЧ-сигнала [10, 11].

2.1. Оптическое усиление в контуре оптоэлектронного генератора

На рис.2 приведена схема оптического усилителя в оптоэлектронном генераторе. Оптический усилитель в контуре оптоэлектронного генератора сконструирован на основе легированного эрбием волокна, а также четырех лазерных диодов (длины волн генерации 1470 и 1490 нм, мощность 15 дБм) и четырех волоконно-оптических мультиплексоров по длине волны, с помощью которых реализуется двунаправленная накачка. Паразитная оптическая генерация в оптическом усилителе подавляется волоконно-оптическими изоляторами.

Эквивалентный собственный шум оптического усилителя на основе легированного эрбием волокна, обусловленный биениями оптического сигнала и усиленного спонтанного излучения, является одним из главных источников

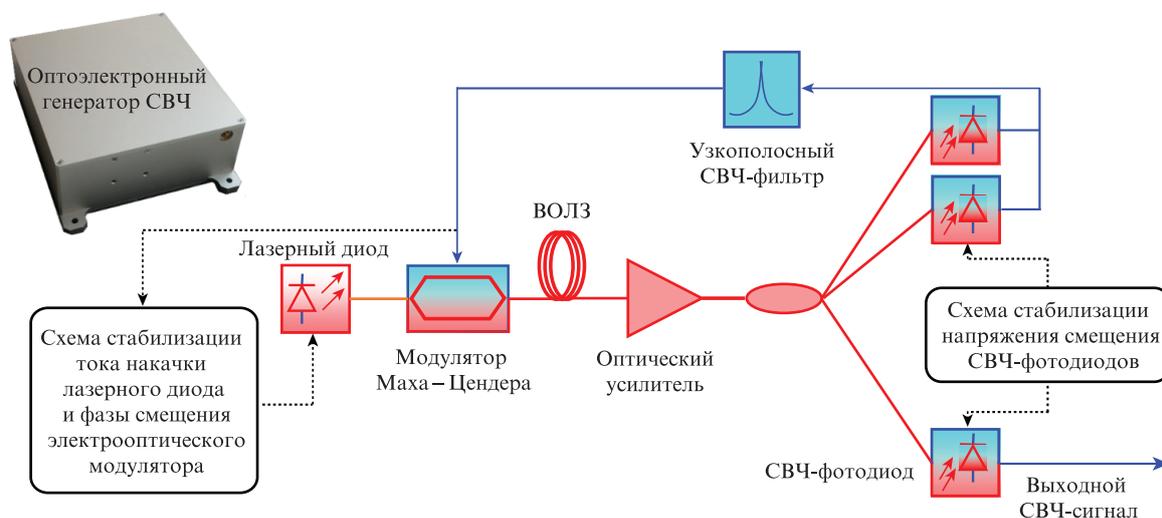


Рис.1. Структурная схема двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ на основе ВОЛЗ с оптическим усилением (на вставке – фотография оптоэлектронного генератора с частотой генерации 10 ГГц и габаритными размерами 257 × 197 × 84 мм).

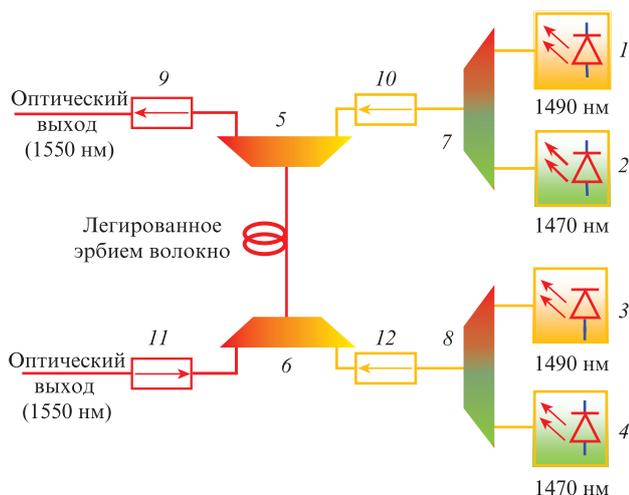


Рис.2. Схема оптического усилителя на основе легированного эрбием волокна в оптоэлектронном генераторе СВЧ: 1–4 – лазерные диоды с распределенной обратной связью; 5–8 – волоконно-оптические мультиплексоры по длине волны; 9–12 – волоконно-оптические изоляторы.

фазового шума в оптоэлектронном генераторе с оптическим усилением [6]. На рис.3 показаны результаты измерения коэффициента усиления и эквивалентного собственного фазового шума оптического усилителя на основе легированного эрбием волокна в зависимости от мощности встречной накачки. Видно, что эквивалентный коэффициент усиления СВЧ-сигнала можно изменять в диапазоне 17–27 дБ путем регулирования мощности встречной накачки в диапазоне 0–15 дБм (мощность прямой накачки при этом остается постоянной), что достаточно просто достигается с помощью изменения тока накачки лазерных диодов.

Следует отметить, что коэффициент усиления транзисторных СВЧ-усилителей с низким фазовым шумом не превышает 8–15 дБ, а эквивалентный коэффициент усиления оптического усилителя для СВЧ-сигналов достигает 30 дБ, причем величина коэффициента усиления сохраняется постоянной для всего диапазона частот ВОЛЗ в оптоэлектронном генераторе, ширина которого достигает значений, превышающих 50 ГГц. Во всем диапазоне изменения коэффициента усиления оптического усилителя

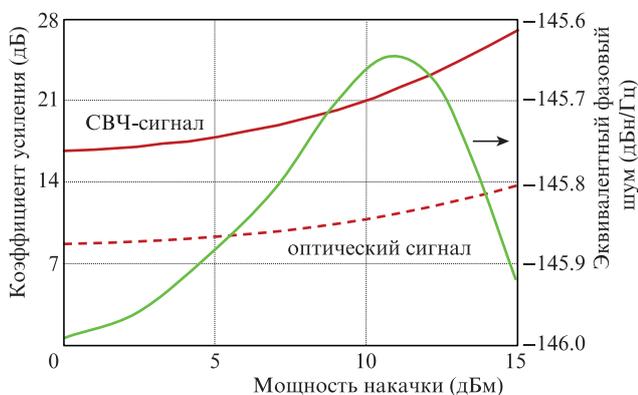


Рис.3. Зависимости коэффициента усиления и эквивалентного собственного фазового шума оптического усилителя на основе легированного эрбием волокна от мощности встречной оптической накачки (мощность прямой оптической накачки 15 дБм, длина легированного эрбием волокна 10 м, глубина оптической модуляции 100%).

ля эквивалентный собственный фазовый шум изменяется не более чем на 0.4 дБ.

2.2. Двухконтурная конфигурация

Для снижения уровня дискретных составляющих в спектре генерации необходимо увеличивать частотную селективность контура обратной связи оптоэлектронного генератора, что достигается при использовании двухконтурной конфигурации [4, 7]. На рис.4 показаны зависимости уровня дискретных составляющих в спектре генерации двухконтурного оптоэлектронного генератора от разности $\Delta\tau$ времен задержки сигнала в дополнительных ВОЛЗ, нормированной на время его задержки τ в основной ВОЛЗ, для различных отношений η_Q эквивалентной добротности ВОЛЗ к добротности узкополосного СВЧ-фильтра:

$$\eta_Q = \pi\tau\Delta f,$$

где Δf – ширина полосы пропускания узкополосного СВЧ-фильтра. Видно, что уровень дискретных составляющих монотонно снижается на более чем 50 дБ при увеличении нормированной разности $\Delta\tau/\tau$ времен задержки сигнала в дополнительных ВОЛЗ до оптимальных значений, составляющих 5%–12%. При дальнейшем увеличении $\Delta\tau/\tau$ наблюдается квазипериодическая зависимость, когда уровень дискретных составляющих увеличивается на 5–10 дБ, а затем снижается до значения, превышающего минимальный уровень дискретных составляющих на 0.2–2 дБ.

Оптимальное значение $\Delta\tau/\tau$ уменьшается при увеличении η_Q , при этом максимальная величина подавления дискретных составляющих также уменьшается. В этом случае подавление дискретных составляющих обеспечивается по принципу периодической фильтрации, а в случае $\Delta\tau/\tau > 0.5$ – по принципу частотного нониуса, для которого значительно возрастают требования к точности определения длин дополнительных ВОЛЗ, необходимых для заданного подавления уровня дискретных составляющих в спектре оптоэлектронного генератора.

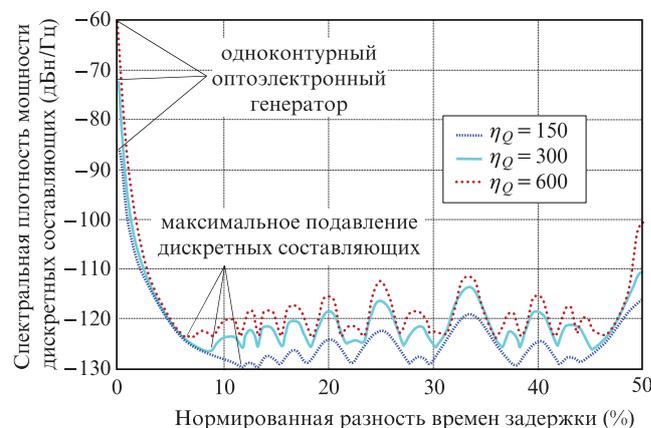


Рис.4. Зависимости уровня дискретных составляющих в спектре генерации двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ от разности времен задержки сигнала в дополнительных ВОЛЗ, нормированной на время его задержки в основной ВОЛЗ, для различных отношений η_Q эквивалентной добротности ВОЛЗ к добротности узкополосного СВЧ-фильтра (частота генерации 10 ГГц, время задержки в основной ВОЛЗ 5 мкс).

3. Динамические нестабильности генерации

В зависимости от коэффициента петлевого усиления g_{ss} в режиме малых сигналов оптоэлектронный генератор СВЧ с оптическим усилением может находиться в следующих режимах: отсутствие генерации ($g_{ss} < 0$ дБ), стационарная генерация ($0 \text{ дБ} \leq g_{ss} \leq 10.3$ дБ), динамические нестабильности генерации ($g_{ss} > 10.3$ дБ). В отсутствие генерации (или подпороговой генерации) усиления контура обратной связи недостаточно для компенсации потерь в оптоэлектронном генераторе. В области стационарной генерации амплитуда генерируемого СВЧ-сигнала монотонно возрастает с увеличением коэффициента усиления контура обратной связи, при этом достигается генерация СВЧ-сигнала с низким фазовым шумом. В области динамических нестабильностей связь коэффициента усиления контура генератора и амплитуды генерируемого СВЧ-сигнала неоднозначна, и имеет место одновременная генерация нескольких сигналов с различными квазистационарными значениями амплитуды и частоты.

На рис.5 показан спектр сигнала в режиме стационарной генерации двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц, измеренный с помощью анализатора спектра Rohde&Schwarz FSW26. Видно, что имеет место стационарная генерация, причем мощность дискретных составляющих в спектре не превышает -94 дБн. Следует отметить, что измеренный спектр генерации вблизи СВЧ несущей ($\Delta f < 500$ кГц) искажен собственным шумом анализатора спектра. Как показано ранее в работе [7], динамические нестабильности генерации возникают в оптоэлектронном генераторе с оптическим усилением при коэффициенте петлевого усиления в режиме малых сигналов $g_{ss} > 10.3$ дБ, т.е. для обеспечения стационарной генерации в таком генераторе необходим коэффициент $g_{ss} = 0 - 10.3$ дБ. Относительная нестабильность мощности генерации определяется оптическим усилителем и находится в пределах ± 0.05 дБ в течение 4–8 ч непрерывной работы после выхода в режим за 30 мин. На рис.6 приведены спектральные плотности мощности фазового и амплитудного шумов выходного сигнала оптоэлектронного генератора в различные моменты времени (оптоэлектронный генератор СВЧ работал непрерывно, интервал между измерениями составлял 4 ч). Видно, что за время между измерениями как фазовый, так и амплитудный шум не изменяются более чем на 1–2 дБ.

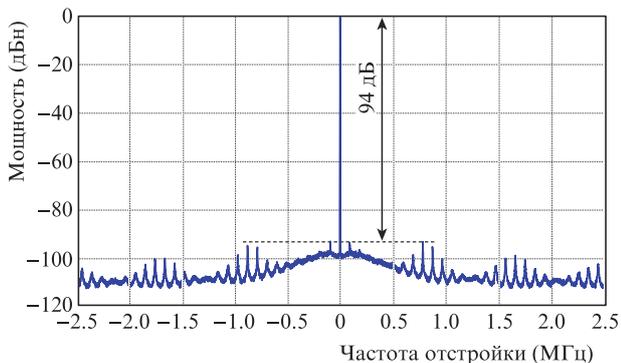


Рис.5. Измеренный спектр сигнала двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц.

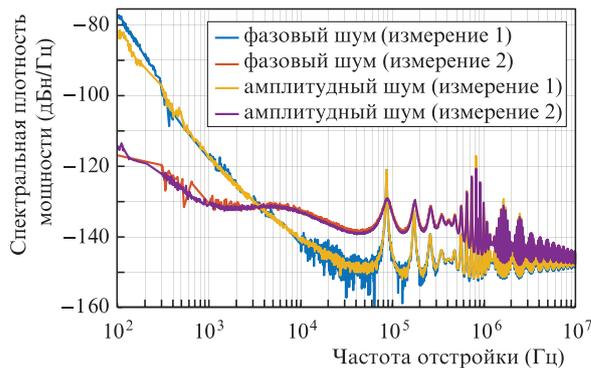


Рис.6. Спектральные плотности мощности фазового и амплитудного шумов двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ в различные моменты времени (оптоэлектронный генератор работал непрерывно, интервал между измерениями составлял 4 ч). Цветные варианты рис.6 и 7 помещены на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

На рис.7 показаны спектры генерации оптоэлектронного генератора с оптическим усилением в режиме динамических нестабильностей генерации, когда коэффициент петлевого усиления в режиме малых сигналов составлял 10.9 дБ. Видно, что в спектре присутствует набор дискретных составляющих, частота которых не совпадает с собственными частотами оптоэлектронного генератора, а спектральное распределение значительно изменяется во времени, т.е. наблюдается нестабильность спектрального состава.

4. Долговременная нестабильность частоты

Оптоэлектронный генератор характеризуется сложной динамикой генерации, поэтому при исследовании влияния факторов окружающей среды на его выходные характеристики необходимо, например, учитывать, как изменяется температура генератора. В общем случае, изменение температуры приводит к изменению времени задержки в отрезках оптического волокна в ВОЛЗ вследствие изменения эффективного показателя преломления сердцевины волокна, а также к смещению центральной частоты СВЧ-фильтра. Если температурные коэффициенты времени задержки и центральной частоты узкополосного СВЧ-фильтра близки по модулю, но различны по знаку, то зависимость частоты генерации от температуры является кусочно-непрерывной, причем в пределах температурного интервала непрерывности частоты генерации температурный коэффициент частоты генерации совпадает с температурным коэффициентом времени задержки сигнала в оптическом волокне, взятым с обратным знаком [9]. В общем случае возможны два режима воздействия изменений температуры на оптоэлектронный генератор:

- изменение температуры до включения генератора (изменилась температура – установилось тепловое равновесие – оптоэлектронный генератор включился – установилась стационарная генерация – оптоэлектронный генератор выключился);
- изменение температуры работающего оптоэлектронного генератора (при некоторой температуре оптоэлектронный генератор включился – изменение температуры происходит одновременно с процессом генерации в нем).

На рис.8 показаны рассчитанные отклонения частоты генерации от ее значения при температуре 20 °С в зависимости от температуры двухконтурного оптоэлектронного генератора для режима изменения температуры до

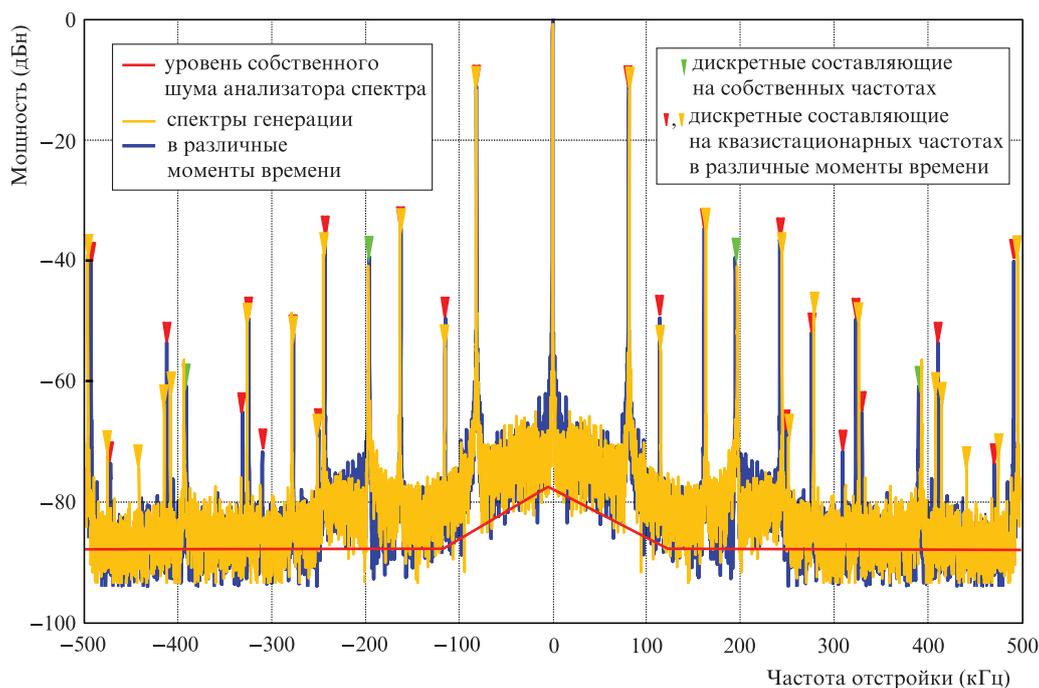


Рис.7. Измеренные в различные моменты времени спектры генерации оптоэлектронного генератора СВЧ в режиме динамических нестабильностей генерации. Полоса анализа анализатора спектра 100 Гц.

включения генератора и режима изменения температуры работающего генератора. Видно, что для режима изменения температуры до включения генератора зависимость частоты генерации от температуры имеет кусочно-непрерывный характер, причем на интервалах непрерывности температурный коэффициент частоты генерации совпадает с температурным коэффициентом времени задержки сигнала в оптическом волокне, взятым с обратным знаком. При этом величина температурного интервала непрерывности частоты генерации оказывается близка к таковой для случая, когда температурные коэффициенты времени задержки сигнала и центральной частоты узкополосного СВЧ-фильтра близки по модулю, но различны по знаку.

Видно также, что для режима изменения температуры работающего оптоэлектронного генератора величина интервалов непрерывности в общем случае произвольна и, как показывает моделирование, сильно зависит от скорости изменения температуры.

Из результатов эксперимента следует, что при изменении температуры окружающей среды от 5 °С до 40 °С частота генерации кусочно-непрерывно изменяется в диапазоне $10.04 \times 10^3 \text{ МГц} \pm 1.757 \text{ МГц}$. Необходимо отметить, что мощность генерации во всем диапазоне температур изменялась не более чем на 3 дБ. При изменении температуры оптоэлектронного генератора возможны переходные процессы с длительностью до 100 времен задержки сигнала в основной ВОЛЗ, при этом фаза сигнала генерации изменяется на несколько десятков градусов. Таким образом, изменение температуры оптоэлектронного генератора в общем случае приводит к кусочно-непрерывной зависимости частоты генерации от температуры, причем при изменении температуры во время работы генератора величина интервала непрерывности зависит от скорости изменения температуры.

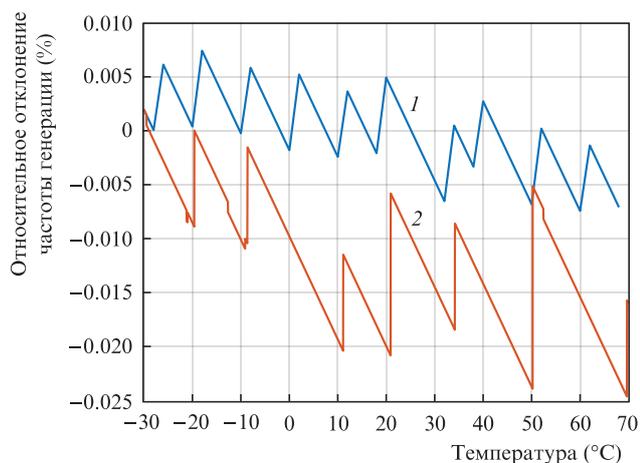


Рис.8. Зависимости относительного отклонения частоты генерации двухконтурного оптоэлектронного генератора от его температуры для режима изменения температуры до включения генератора (1) и режима изменения температуры работающего оптоэлектронного генератора (2) (частота генерации 10 ГГц, ширина полосы пропускания узкополосного СВЧ-фильтра 10 МГц, коэффициент петлевого усиления в режиме малых сигналов 8 дБ, температурный коэффициент частоты узкополосного СВЧ-фильтра $1.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

5. Обеспечение долговременной стабильности

Оптоэлектронные генераторы являются автогенераторами на линиях задержки, поэтому они обладают дискретным набором собственных частот, спектральное положение которых определяется временем задержки, которое, в свою очередь, зависит от температуры окружающей среды. В случае перестройки частоты между собственными частотами при изменении температуры оптоэлектронного генератора не происходит срыва или замирания генерации СВЧ-сигнала, а также не снижается спектральная чистота генерируемого сигнала. Это позволяет использовать систему с фазовой автоподстройкой частоты для стабилизации частоты оптоэлектронного генератора в режиме

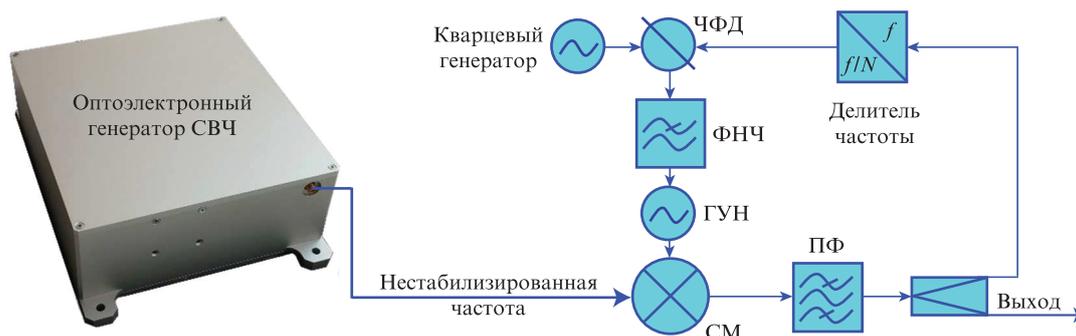


Рис.9. Схема оптоэлектронного опорного генератора СВЧ:

СМ – радиочастотный смеситель; ПФ – полосовой фильтр; ЧФД – частотно-фазовый детектор; ФНЧ – петлевой фильтр низких частот; ГУН – генератор, управляемый напряжением.

свободной генерации. На рис.9 приведена схема оптоэлектронного опорного генератора с устройством для стабилизации частоты с фазовой автоподстройкой. Система фазовой автоподстройки частоты выполняет функцию стабилизации разности частот оптоэлектронного генератора, работающего в режиме свободной генерации, и частоты высокочастотного генератора, управляемого напряжением, путем ее сравнения в частотно-фазовом детекторе с частотой высокостабильного генератора [12, 13], в качестве которого использовался кварцевый генератор с нестабильностью частоты 3×10^{-9} в диапазоне температур от -40°C до $+70^\circ\text{C}$. Данный метод позволяет стабилизировать выходную частоту опорного генератора, при этом оптоэлектронный генератор по-прежнему работает в режиме свободной генерации.

На рис.10 проказан фазовый шум оптоэлектронного опорного генератора, измеренный с помощью анализатора фазового шума Agilent E5052B. Видно, что для частот отстройки свыше 300 Гц фазовый шум оптоэлектронного опорного генератора со стабилизированной частотой совпадает с фазовым шумом оптоэлектронного генератора в режиме свободной генерации. Следует отметить, что на частотах отстройки от СВЧ несущей свыше 10 кГц спектр искажен собственным шумом анализатора.

Исследование стабильности частоты оптоэлектронного опорного генератора проводилось в камере тепла-холода в диапазоне температур $5^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$. Во всем исследованном диапазоне уход частоты генерации не превысил 11 Гц, т. е. относительная нестабильность частоты не превысила 3×10^{-9} и соответствует стабильности частоты кварцевого генератора. Температурный коэффициент частоты оптоэлектронного опорного генератора с предложенной архитектурой системы стабилизации частоты оп-

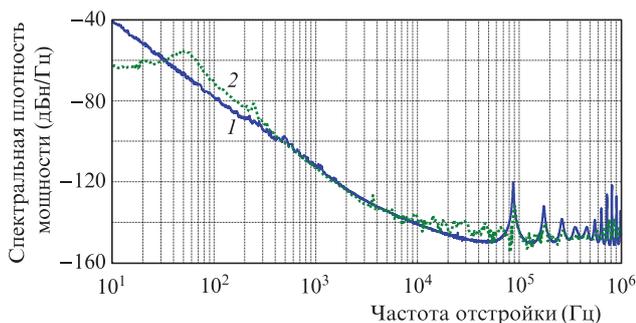


Рис.10. Измеренный фазовый шум двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ в режиме свободной генерации (1) и в случае его синхронизации с кварцевым генератором (2).

ределяется температурной нестабильностью используемого высокостабильного кварцевого генератора, при этом сохраняется высокая спектральная чистота выходного сигнала.

6. Заключение

Разработанный двухконтурный оптоэлектронный опорный генератор СВЧ с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц одновременно обеспечивает сверхнизкий фазовый шум (менее -142дБн/Гц) на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ несущей и низкий уровень дискретных составляющих в спектре генерации (не более -94 дБн). Система фазовой автоподстройки частоты выполняет функцию стабилизации разности частот оптоэлектронного генератора, который работает в режиме свободной генерации, и частоты высокочастотного генератора, управляемого напряжением, путем ее сравнения с частотой высокостабильного кварцевого генератора в частотно-фазовом детекторе. При этом температурный коэффициент частоты опорного оптоэлектронного генератора с предложенной архитектурой системы стабилизации частоты определяется температурной нестабильностью используемого высокостабильного кварцевого генератора.

1. Обнаружение и распознавание объектов радиолокации. Под ред. А.В.Соколова (М.: Радиотехника, 2006).
2. Urlick V.J., Williams K.J., McKinney J.D. *Fundamentals of Microwave Photonics* (New York: Wiley, 2015).
3. Oldyniec M. *RF and Microwave Oscillator Design* (Boston: Artech House, 2002).
4. Levy E.C., Horowitz M., Menyuk C.R. *J. Opt. Soc. Am. B*, **26**, 1 (2009).
5. Mikitchuk K., Chizh A., Malyshev S. *Proc. 24th Int. Conf. on Noise and Fluctuations (ICNF-2017)* (Vilnius, 2017).
6. Микитчук К.Б., Чиж А.Л., Малышев С.А. *Труды 6-й Всерос. научн. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ»* (С.-Петербург, 2017).
7. Mikitchuk K., Chizh A., Malyshev S. *IEEE J. Quantum. Electron.*, **52**, 10 (2016).
8. Tseng W.H., Feng K.M. *Opt. Express*, **20**, 2 (2012).
9. Mikitchuk K., Chizh A., Malyshev S. *Proc. IEEE Int. Top. Meeting on Microwave Photonics (MWP2015)* (Pafos, 2015).
10. Микитчук К.Б., Чиж А.Л., Малышев С.А. *Труды 7-й Всерос. научн. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ»* (С.-Петербург, 2018).
11. Mikitchuk K., Chizh A., Malyshev S. *Proc. IEEE Int. Conf. on Numerical Electromagnet., Modeling and Optimiz. for RF, Microwave, and Terahertz Appl. (NEMO-2014)* (Pavia, 2014).
12. Razavi B. *IEEE J. Solid-State Circuits*, **42**, 12 (2007).
13. Yanhong Zhu, et. al. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **28**, 22 (2016).