

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.9>

УДК: 621.373, 621.391.822

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТОЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ЧАСТОТЫ W-ДИАПАЗОНА С НИЗКИМ УРОВНЕМ ПАРАЗИТНЫХ ГАРМОНИК

А. Шаншо, И.О. Дорофеев, Г.Е. Дунаевский, Е.В. Емельянов

Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Томск, пр. Ленина, 36

Статья поступила в редакцию 3 июля 2023 г.

Аннотация. Для приложений миллиметрового диапазона в W-диапазоне 93,5-95,5 ГГц востребованы усовершенствованные синтезаторы частоты. Такой синтезатор частоты должен быть перестраиваемым, с высоким частотным разрешением и обладать низкими фазовыми шумами, низким уровнем паразитных гармоник и коротким временем синхронизации. Эти требования при разработке высокоточного генератора частоты с чистым спектром, являются противоречивыми. Поэтому необходимо найти оптимальные соотношения между ними. В данной работе построен синтезатор частоты на основе диода Ганна, двух стабильных перестраиваемых источников частот, контура ФАПЧ и субгармонического смесителя 10-го порядка в цепи обратной связи. Проанализированы фазовый шум, уровни паразитных гармоник и размер шага перестройки генератора ФАПЧ, и проведена оценка влияния каждого параметра на остальные. Для проверки работоспособности предлагаемого синтезатора частот с помощью анализатора спектра был измерен выходной спектр промежуточной частоты на субгармоническом смесителе, который соответствует спектру генератора с ФАПЧ. Результаты показывают, что предлагаемый генератор с ФАПЧ можно перестраивать с шагом менее 1 Гц, а

первые две паразитные гармоники далеки от основной гармоники (200 МГц). Полученные результаты могут быть использованы для разработки усовершенствованного высокоточного синтезатора частоты с низким уровнем побочных гармоник и низкими фазовыми шумами в приложениях миллиметрового диапазона.

Ключевые слова: фазовый шум, диод Ганна; субгармонический смеситель; паразитные гармоники; гетеродин.

Автор для переписки: Шаншо Ахмад, ahmadsho1@gmail.com

Введение

В последнее время развитие техники и технологий привело к широкому использованию частот миллиметрового диапазона. К ним относятся применения в области радиосвязи и радиолокации [1, 2, 3], а также в области физики, такие как измерение свойств материалов [4, 5, 6]. Генератор сверхвысоких частот с улучшенными характеристиками в отношении фазового шума, стабильности частоты, шага перестройки и выходной мощности является основным компонентом этих систем. Такой генератор частот может быть выполнен двумя способами. Первый способ заключается в использовании источника низкой частоты, а затем ее повышении с помощью умножителей частот [7, 8]. Второй способ заключается в использовании генератора частоты, выходная частота которого может быть изменена путем изменения постоянного напряжения на входе в дополнение к контуру фазовой автоподстройки частоты [9, 10, 11]. На частотах в W-диапазоне синтезатор частот, использующий первый подход, был бы дорогостоящим и сложным, поскольку он требует критической фильтрации и нескольких каскадов усилителей. Кроме того, в его выходном спектре присутствуют нежелательные гармоники, кратные опорной частоте, а его мощность составляет менее 1 мВт [12, 13]. Поэтому, в W-диапазоне синтезаторы частоты на основе второго метода получили наибольшее распространение и могут удовлетворять самым высоким требованиям.

Диоды Ганна представляют собой генераторы, управляемыми постоянным напряжением и могут использоваться в качестве генератора, управляемого основным напряжением, в генераторе с ФАПЧ на частотах в W-диапазона и выше.

Генератор на диоде Ганна был рассмотрен в ряде работ [14, 15, 16]. Однако оптимизация характеристик таких генераторов с точки зрения уменьшения времени синхронизации, уменьшения уровня паразитных гармоник, фазового шума, шага настройки в целом в W-диапазоне не проводилась. Особенно это касается низкоуровневых паразитных гармоник.

В данной работе представлен анализ и разработка гибридного синтезатора частоты на основе диода Ганна, гармонического смесителя 10-го порядка и двух стабильных опорных генераторов, а также предприняты дополнительные усилия по расширению диапазона, свободного от паразитных гармоник. Представленная гибридная форма синтезатора частот позволяет оптимизировать рабочие параметры синтезатора частот.

1. Анализ и описание работы системы

Схема генератора с ФАПЧ на основе диода Ганна и смесителя на гармониках показана на рис. 1. Чтобы обеспечить генерацию в диапазоне, определяемым источником опорной частоты, обычно кварцевым генератором, используется понижающий преобразователь на основе смесителя на гармониках K-го порядка в цепи обратной связи. Как показано на рис. 1, схема синтезатора включает в себя накачку заряда (НЗ), фазочастотный детектор (ФЧД), преобразователь частоты с понижением частоты (смеситель на гармониках K-го порядка и делитель частоты на N) и петлевой фильтр (ПФ).

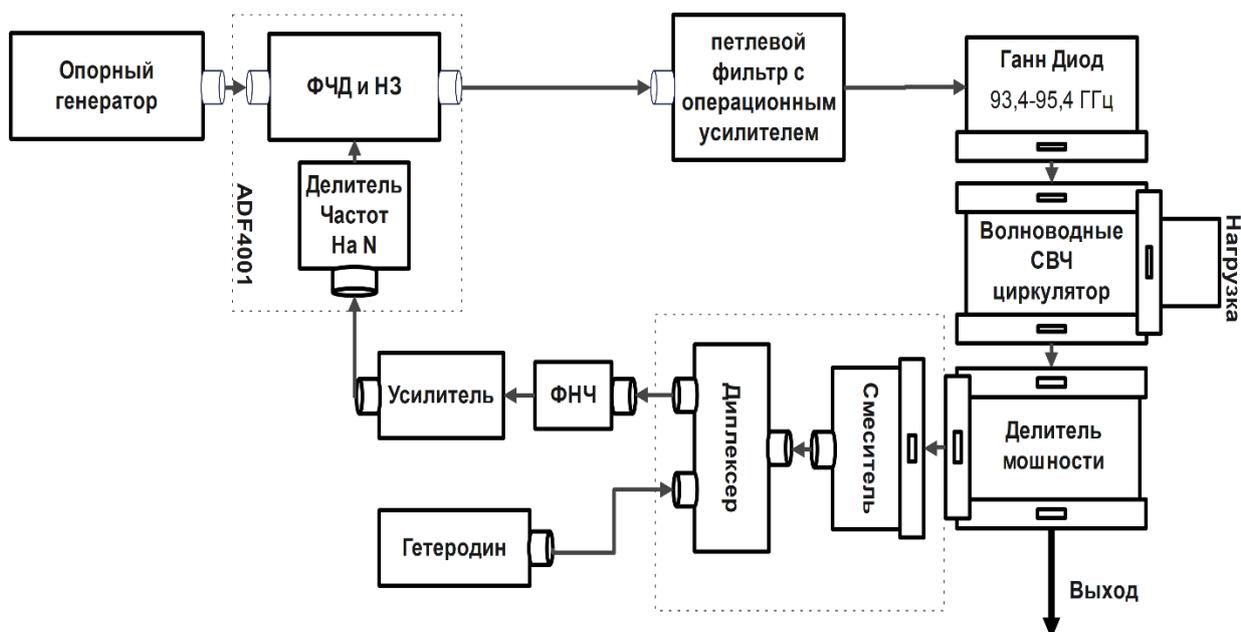


Рис. 1. Блок-схема синтезатора частот на основе диода Ганна и смесителя на гармониках

В дополнение к этим компонентам он включает в себя генератор на основе диода Ганна в качестве основного генератора и кварцевый генератор в качестве генератора опорной частоты. Схема также включает в себя смеситель на гармониках, используемый в качестве предварительного делителя для преобразования с понижением частоты выходного сигнала диода Ганна в промежуточную частоту $f_{ПЧ}$, так что она попадает в рабочий диапазон делителя обратной связи. Затем ФЧД выполняет сравнение фазы и частоты опорного сигнала и сигнала обратной связи после деления частоты. В соответствии со знаком результата вычитания между частотой обратной связи и генератором опорной частоты, ФЧД генерирует соответствующий сигнал на НЗ. НЗ обеспечивает более высокий выходной ток, когда знак сравнения отрицательный, и более низкий выходной ток, когда знак сравнения положительный. С выхода НЗ сигнал поступает на фильтр нижних частот для удаления нежелательных составляющих и выделения постоянного напряжения, которое управляет частотой генератора Ганна. Ее значение можно рассчитать следующим образом:

$$f_{Ганн} = f_{Г} \times K + f_{Он} \times N, \quad (1)$$

где f_{On} – частота опорного генератора, K – порядок гармонического смесителя, N – коэффициент деления обратной связи, $f_{Г}$ – частота гетеродина.

Что касается фазового шума на выходе системы, то, учитывая только фазовый шум гетеродина и опорного генератора (поскольку они вносят наибольший вклад в уровень фазового шума), выходной фазовый шум синтезатора с ФАПЧ (как функцию фазового шума опорного генератора s_{On} , фазового шума гетеродина и фазового шума генератора на диоде Ганна без ФАПЧ $s_{Ганн0}$), можно определить как [15]:

$$s_{Ганн} = \begin{cases} N \times s_{On} + K \times s_{Г} & \text{Внутри полосы пропускания петли} \\ s_{Ганн0} & \text{Вне полосы пропускания петли} \end{cases} \quad (2)$$

Если используемые генератор опорной частоты и гетеродин имеют низкий фазовый шум и коэффициент деления небольшой, то фазовый шум в полосе пропускания контура будет меньше, чем фазовый шум автономного генератора на диоде Ганна.

Паразитные гармоники – это нежелательные сигналы, которые появляются на частотах, отличных от основной частоты системы. Это результат использования зарядового насоса на выходе ФЧД, он пропорционален утечке тока на выходе контурного фильтра. Это следует из формулы для напряжения настройки петлевого фильтра, которое определяется как [17]:

$$V_{Наст} = V_0 + I_{НЗ} \times Z_{ПФ} \times \sin(2\pi f_{On} t), \quad (3)$$

где: $V_{Наст}$ – выходное напряжение петлевого фильтра; V_0 – напряжение постоянного тока от петлевого фильтра; $I_{НЗ}$ – ток накачки заряда; $Z_{ПФ}$ – импеданс петлевого фильтра.

Поскольку выходная частота синтезатора пропорциональна $V_{Наст}$, паразитные гармоники возникают на частотах $f_{Ганн} \pm n \times f_{On}$. Уровень этих паразитных гармоник может быть дополнительно снижен с помощью контурного фильтра за счет использования фильтра более высокого порядка и уменьшения полосы пропускания контура. Однако меньшая полоса пропускания означает ухудшение характеристик фазового шума, как упоминалось ранее, а

также увеличивает время синхронизации контура ФАПЧ. Другая проблема возникает из-за того, что в данном случае шаг настройки равен опорной частоте, а это означает, что для его уменьшения опорная частота также должна быть уменьшена, однако при этом рядом с основной частотой появится больше паразитных гармоник.

Таким образом, требования минимизации уровня паразитных гармоник, улучшения характеристик фазового шума, сокращение времени синхронизации и минимизации шага настройки, как отмечалось выше, являются противоречивыми. В этом случае опорная частота должна быть достаточно высокой (для подавления паразитных гармоник), полоса пропускания контура-большой, а шаг перестройки минимальным. Лучшим решением является использование цифрового синтезатора частот в качестве опорного генератора для управления основным источником, поскольку его выходная частота будет соответствовать входной частоте в ФЧД. В этом случае шаг перестройки будет равен шагу перестройки опорного генератора, умноженному на коэффициент деления обратной связи.

2. Экспериментальные исследования

Для проверки работоспособности синтезатора частот был проведен эксперимент, блок-схема установки показана на рис. 1. Параметры системы, используемые в эксперименте, следующие:

- генератор опорной частоты - кварцевый генератор 100 МГц;
- дуплексер имеет три порта (два входа и один выход). Он обеспечивает функциональность фильтра нижних частот 2 ГГц на выходе порта ПЧ, полосового фильтра от 7 до 9 ГГц на порту гетеродина и фильтра нижних частот 10 ГГц на порте ВЧ, подключенном к смесителю;
- гармонический смеситель 10-го порядка для преобразования с понижением частоты генератора на диоде Ганна путем смешивания ее с частотой 9,4 ГГц, поступающей от гетеродина через дуплексер. Это преобразует

высокочастотный сигнал диода Ганна в сигнал ПЧ 300 МГц на выходе диплексера;

- петлевой фильтр с полосой пропускания 1 МГц, для расширения полосы частот с низким фазовым шумом.

Измерения проводились с помощью анализатора спектра E4405B. Спектр сигнала на выходе смесителя на гармониках измерялся в разных полосах обзора, чтобы показать паразитные гармоники далеко и близко от основной гармоники. На рис.2 (а), (б) показаны спектры сигнала 300 МГц, соответствующего выходной частоте $10 \times 9400 + 300 = 94300$ МГц при полосе обзора 200 МГц при работе генератора Ганна в автономном режиме и с ФАПЧ соответственно.

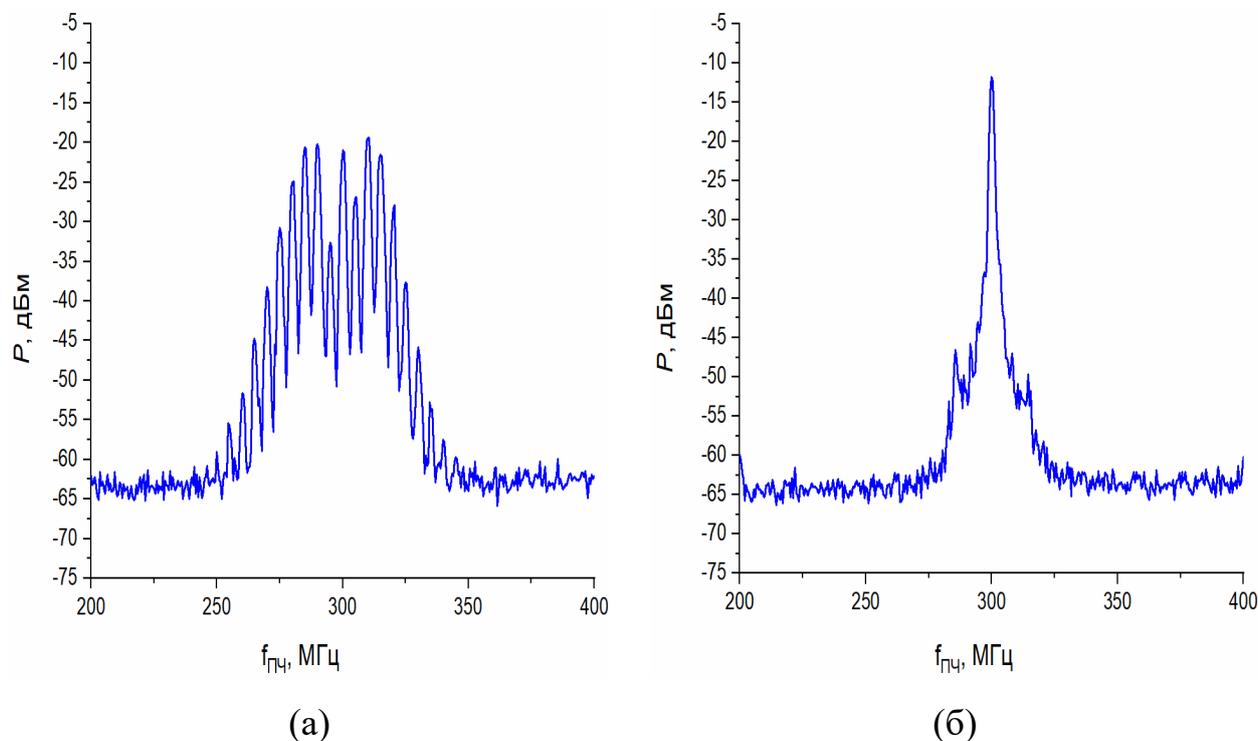


Рис. 2. Спектры сигнала 300 МГц, соответствующие выходной частоте 94300 МГц при полосе обзора 200 МГц при работе генератора Ганна в автономном режиме (а) и с ФАПЧ и субгармоническим смесителем 10-го порядка (б)

Чтобы показать паразитные гармоники близко от основной гармоники, полоса обзора была уменьшена до 1 МГц. На рис.3 (а), (б) показаны спектры сигнала 300 МГц, соответствующего выходной частоте $10 \times 9400 + 300 = 94300$ МГц при полосе обзора 1 МГц при работе генератора Ганна в автономном режиме и с ФАПЧ соответственно.

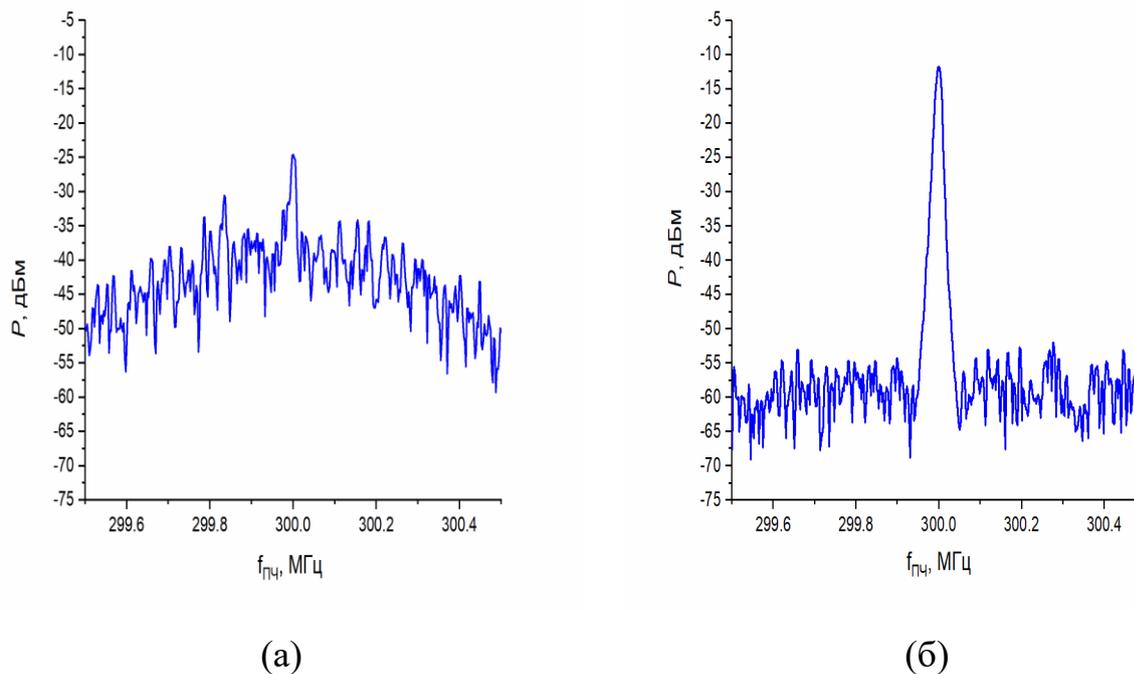


Рис. 3. Спектры сигнала 300 МГц, соответствующие выходной частоте 94300 МГц при полосе обзора 1 МГц при работе генератора Ганна в автономном режиме (а) и с ФАПЧ и субгармоническим смесителем 10-го порядка (б)

Рис. 2 и 3 показывают заметное улучшение спектра основного генератора. Также был проведен анализ возможности уменьшения шага перестройки в этом случае. Если опорная частота кварцевая, шаг перестройки будет равен 100 МГц. Для сравнения спектра сигнала для разных опорных частот использовались значения 10 МГц, 25 МГц и 100 МГц. На рис. 4 показан спектр выходного сигнала гармонического смесителя для каждой из этих частот. Как видно из данного рисунка, появляются паразитные сигналы на расстоянии, равном опорной частоте. Поэтому, для уменьшения числа паразитных гармоник, лучше использовать более высокую опорную частоту.

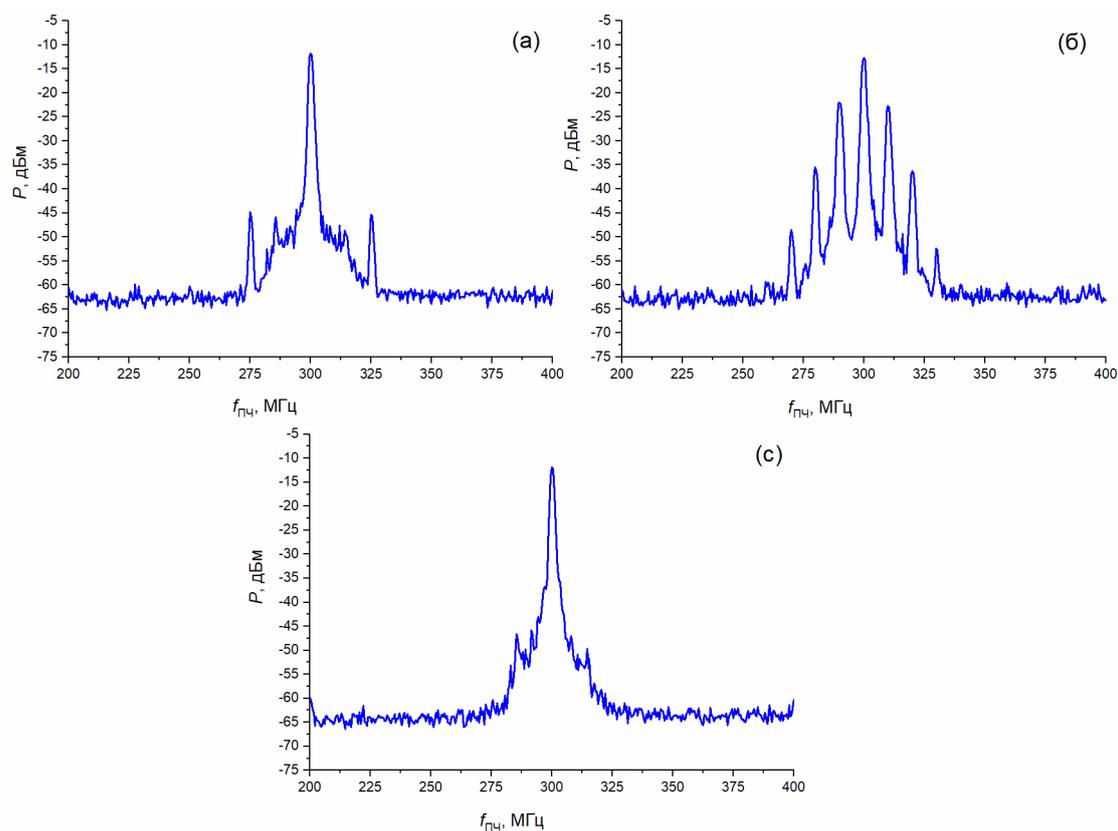


Рис. 4. Спектры сигнала 300 МГц, соответствующие выходной частоте 94300 МГц при полосе обзора 200 МГц, когда опорная частота равна 10 MHz (а), 25 MHz (б), 100 MHz (с)

Уровень этих паразитных гармоник можно снизить, используя более узкий петлевой фильтр, но при этом увеличится время захвата и фазовый шум. Поэтому лучшим решением для улучшения всех параметров является использование синтезатора частот в гибридной форме.

В гибридном синтезаторе частоты опорным генератором является не кварцевый, а перестраиваемый цифровой синтезатор частоты. В этом случае шаг настройки равен шагу настройки опорного генератора, умноженному на коэффициент деления обратной связи. Этот гибридный режим позволяет поднять опорную частоту, чтобы паразитные гармоники оказались далеко от основной гармоники. Это также позволит настраивать выход с шагом менее 1 Гц без ухудшения фазового шума за счет использования более узкого петлевого фильтра. Еще одним преимуществом этого режима является то, что ширина фильтра может быть равна 1 МГц, чтобы улучшить фазовый шум в более широкой полосе и в то же время уменьшить время захвата.

Заключение

Были проанализированы фазовый шум, уровни паразитных гармоник и размер шага перестройки генератора с ФАПЧ и исследовано влияние каждого параметра на остальные. Был измерен выходной спектр промежуточной частоты 300 МГц на субгармоническом смесителе, который соответствует частоте 94300 МГц. Результаты эксперимента показали необходимость в более высокой опорной частоте, чтобы избавиться от близких паразитных гармоник, и в то же время в большей полосе пропускания фильтра для улучшения характеристик фазового шума. В качестве наилучшего решения была предложена гибридная форма частотного синтезатора. Измерение показало возможность получить синтезатор частот с диапазоном 200 МГц, свободным от паразитных частот, размером шага перестройки менее 1 Гц и хорошими характеристиками фазового шума.

Литература

1. Macfarlane D. G., Robertson D. A. SAFIRE: A close range real time millimetre wave radar for public education //2007 Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and the 15th International Conference on Terahertz Electronics. – IEEE, 2007. – P. 924-925.
<https://doi.org/10.1109/ICIMW.2007.4516794>
2. Chen J. et al. Design of silicon based millimeter wave oscillators //2016 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – IEEE, 2016. – V. 1. – P. 261-263.
<https://doi.org/10.1109/ICMMT.2016.7761742>
3. Futatsumori S., Shibagaki N. 96 GHz Millimeter-Wave Radar System for Airport Surface Detection Purpose //2022 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA). – IEEE, 2022. – P. 1-2.
<https://doi.org/10.1109/CAMA56352.2022.10002564>
4. Nguyen K. N. et al. Millimeter wave dielectric permittivity measurements of common materials //2006 Joint 31st International Conference on Infrared

- Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics. – IEEE, 2006. – P. 483-483. <https://doi.org/10.1109/ICIMW.2006.368691>
5. Korolev K. A., Afsar M. N. Complex dielectric permittivity measurements of materials in millimeter waves //2005 Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics. – IEEE, 2005. – V. 2. – P. 594-595. <https://doi.org/10.1109/ICIMW.2005.1572681>
 6. Korolev K. A., Chen S., Afsar M. N. Dielectric and magnetic measurements on ferrite ceramics at millimeter waves //2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007. – IEEE, 2007. – P. 1-5., <https://doi.org/10.1109/IMTC.2007.379139>
 7. Siligaris A. et al. A multichannel programmable high order frequency multiplier for channel bonding and full duplex transceivers at 60 GHz band //2020 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). – IEEE, 2020. – P. 259-262. <https://doi.org/10.1109/RFIC49505.2020.9218433>
 8. Fischer A. et al. A 77-GHz SiGe frequency multiplier ($\times 18$) for radar transceivers //2010 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM). – IEEE, 2010. – P. 73-76. <https://doi.org/10.1109/BIPOL.2010.5667947>
 9. Irimajiri Y. Stabilization of a Lasing Frequency of a THz-QCL in Free Running for Long-Term Phase-Locking //2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). – IEEE, 2020. – P. 1-2. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370396>
 10. Mohandas R. A. et al. High-resolution frequency and phase control of a terahertz laser //2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). – IEEE, 2019. – P. 1-2. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8873906>
 11. Fujiwara K. et al. A simple-structure FMCW radar test system using PLL-Gunn oscillator and fundamental mixer in 79 GHz band //2018 International Conference on Radar (RADAR). – IEEE, 2018. – P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2018.8557238>

12. Weber R. et al. A W-Band $\times 12$ Multiplier MMIC With Excellent Spurious Suppression //IEEE microwave and wireless components letters. – 2011. – V. 21. – №. 4. – P. 212-214. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2011.2106486>
13. Mazor N., Socher E. X-band to W-band frequency multiplier in 65 nm CMOS process //IEEE microwave and wireless components letters. – 2012. – V. 22. – №. 8. – P. 424-426. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2012.2207708>
14. Ohue K., Kuroki F., Yoneyama T. Analysis on locking characteristics of band-stop type of self-injection locked NRD guide Gunn oscillator at 60 GHz //2009 Asia Pacific Microwave Conference. – IEEE, 2009. – P. 2292-2295. <https://doi.org/10.1109/APMC.2009.5385440>
15. Fujiwara K. et al. A simple-structure FMCW radar test system using PLL-Gunn oscillator and fundamental mixer in 79 GHz band //2018 International Conference on Radar (RADAR). – IEEE, 2018. – P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2018.8557238>
16. Zhou C., Xiaohong T. A W-Band 2 nd Subharmonic Injection-Locked Phase-Locked Loop with Large Locking Range //2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. – IEEE, 2007. – P. 351-354. <https://doi.org/10.1109/MAPE.2007.4393620>
17. Zhou C., Xiaohong T. A W-Band 2 nd Subharmonic Injection-Locked Phase-Locked Loop with Large Locking Range //2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. – IEEE, 2007. – P. 351-354. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2905767>

Для цитирования:

Шаншо А., Дорофеев И.О., Дунаевский Г.Е. Емельянов Е.В. Анализ и разработка высокоточного генератора частоты w-диапазона с низким уровнем паразитных гармоник. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.9>