

Синтезатор частот 55–65 ГГц диапазона для работы с высокочастотными резонаторами

А. Шаншо*

Томский государственный университет (ТГУ),
радиофизический факультет, кафедра радиоэлектроники
Россия, 634045, Томск, ул. Ф. Лыткина, 28г, корпус №11
(Поступила в редакцию 18.05.2022; подписана в печать 20.06.2022)

Разработан и реализован экспериментально недорогой, высокоточный синтезатор с низким уровнем фазового шума в диапазоне частот 55–65 ГГц при мощности 3 мВт. Ширина линии составила менее 1 Гц, и определяется шириной линии генератора опорной частоты. Поскольку частота лампы обратной волны регулируется изменением входного напряжения, стабилизация частоты была достигнута за счет использования фазовой автоподстройки частоты. При этом стабильность определяется эталонным генератором и составляет от 1 Гц (кратковременная стабильность) до 100 Гц (долговременная стабильность). Фазовый шум стабилизируемого генератора возрастает за счет увеличения коэффициента деления обратной связи. Соответственно, для уменьшения фазового шума требуется низкий коэффициент деления, поэтому был использован субгармонический смеситель для понижающего преобразования высокой частоты в низкую промежуточную частоту. Полученные результаты открывают возможности измерения свойств малых образцов материалов с использованием открытых резонаторов, позволяют создать высокоточный стабильный генератор с низким уровнем фазового шума в терагерцовом диапазоне.

PACS: 84.40.Fe. УДК: 621.385.6.

Ключевые слова: ЛОВ, ФАПЧ, открытые резонаторы, субгармонический смеситель, фазовый шум, стабильность.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время применение открытых резонаторов позволяет производить точные измерения параметров веществ [1–3]. Принцип этих измерений основан на наблюдении за изменением резонансной частоты и амплитуды резонансной кривой. Но, чем меньше размер вносимого в резонатор объекта, тем менее заметными становятся изменения резонансной кривой. Возникает необходимость с высоким частотным разрешением наблюдать ее изменения [4]. Для этих целей необходим генератор частот с улучшенными характеристиками в отношении стабильности частоты, фазового шума, шага перестройки частоты, запаса мощности.

Несмотря на большое развитие твердотельных элементов электроники в V-диапазоне и более высоких частотах в последнее десятилетие, создание синтезаторов на их основе по-прежнему сталкивается со многими трудностями, такими как малая мощность, высокая чувствительность к статическому электричеству и высокая стоимость. Например, в [5] был разработан синтезатор частоты с ФАПЧ на основе микросхемы генератора, управляемого напряжением. Он обеспечивает диапазон перестройки от 46.5 до 51.5 ГГц с высокой стабильностью, но максимальная выходная мощность составляет 1 мВт на частоте 47 ГГц. Другим примером является синтезатор на основе утроителя (умножения частоты на 3) [6]. Диапазон выходных частот утроителя частоты здесь составляет от

44.01 до 53.28 ГГц. Но измеренная спектральная плотность мощности утроителя частоты составила 2 мкВт на частоте 48.878 ГГц. Очевидно, что оба упомянутых синтезатора имеют выходную мощность, не достаточную для резонаторных измерений, возникает необходимость в малозумящих усилителях на этих высоких частотах, дополнительных изоляторах, что еще больше увеличивает стоимость. С другой стороны, в лабораториях, осуществляющих измерения радиоволновых параметров материалов, по-прежнему широко используются лампы обратной волны (ЛОВ), [7–9]. Это связано с тем, что с их помощью возможно перекрытие частот в диапазоне до 1.5 ТГц с высокой выходной мощностью [10]. Однако, ЛОВ, как известно, страдает плохими характеристиками фазового шума, грубой настройкой и низкой стабильностью генерируемой частоты [11].

Стабильность ЛОВ может быть повышена за счёт дополнительной стабилизации высоковольтного питания, но, при этом стабильность останется, все же, намного ниже, чем у твердотельных генераторов, да и другие характеристики, такие как фазовый шум и шаг настройки, не будут улучшены. Другим способом стабилизации ЛОВ является применение гармонического смещения с сигналом опорного более низкочастотного высокостабильного генератора и использование фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), позволяющим объединить главные достоинства обоих устройств, а именно высочайшую спектральную чистоту и тонкую настройку, присущую опорному генератору с высокой выходной мощностью ЛОВ.

Несмотря на то, что в прошлом ФАПЧ широко разрабатывалась как теоретически, так и экспериментально, необходимо принять во внимание дополнительные

* ahmadshol@gmail.com

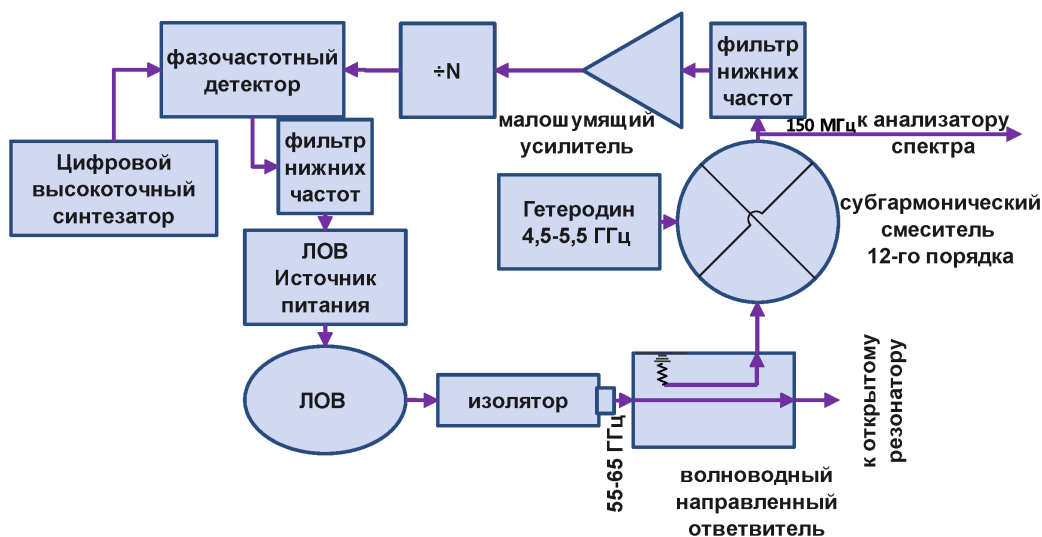


Рис. 1. Структурная схема синтезатора частот 55–65 ГГц диапазон на основе ЛОВ и ФАПЧ

особенности, связанные с применением ее на высоких частотах и требованиями технологии измерений параметров открытого резонатора. Возникает несколько проблем, связанных с необходимостью разрешить конфликты между требуемыми характеристиками измерительного генератора и возможностями данной схемы стабилизации. Одна из этих проблем возникает из-за уменьшения шага перестройки до 1 Гц, что требует уменьшения полосы пропускания петлевого фильтра. Это увеличивает время захвата, а также делает малореальной возможность создания фильтрующих элементов. Другая проблема возникает из-за необходимости охвата всего диапазона настройки ЛОВ, в пределах которого сохраняется его устойчивость. Это требует увеличения коэффициента деления обратной связи, отрицательно влияющего на характеристиках фазового шума всей системы. Дополнительная проблема возникает из-за высокого коэффициента потерь преобразования гармонического смесителя: при большом коэффициенте деления мощность сигнала промежуточной частоты на выходе становится очень низкой. Это требует использования усилителя с большим усилением, что, в свою очередь, увеличивает частотные и фазовые шумы.

Чтобы преодолеть эти проблемы, целесообразно оптимизировать и параметры PLL, и выбор используемых компонентов и микросхем системы, принимая во внимание также и взаимовлияние их параметров.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В качестве генератора опорной частоты в системе ФАПЧ для стабилизации частоты ЛОВ-источника непрерывного излучения предлагается использовать генератор перестраиваемой частоты Agilent E8363B, обеспечивающий точность установки частоты не ху-

же 1 Гц. В этом случае спектральная чистота, стабильность и точная настройка генератора Agilent переносятся на генератор ЛОВ. В качестве фазово-частотного детектора предлагается использовать микросхему ADF4002. Кроме того, система содержит направленный ответвитель, стабильный Гетеродин на частоте 5 ГГц, субгармонический смеситель, малошумящие усилители, фильтр нижних частот и сосредоточенные элементы для петлевого фильтра. Блок-схема установки, позволившая нам реализовать эту систему, представлена на рис. 1.

ЛОВ непрерывно генерирует электромагнитное излучение, которое затем волноводным направленным ответвителем разветвляется на две части. Большая часть мощности передается на измерительную установку с открытым резонатором, а другая — передается на субгармонический смеситель. Субгармоническим смесителем гармоник сигнал ЛОВ преобразуется с понижением частоты в сигнал ПЧ 150 МГц с использованием 12-й гармоники стабильного гетеродина 5 ГГц. Промежуточная частота на выходе смесителя фильтруется фильтром нижних частот от 0 до 500 МГц, усиливается на 60 дБ с помощью трех каскадных малошумящих усилителей, а затем подается на фазово-частотный детектор ADF4002. Так как мощность выходного сигнала смесителя очень мала (менее -60 дБм), в качестве первого каскада в каскадных усилителях используется малошумящий усилитель SPF5189 (с коэффициентом шума $N_F = 0.6$ дБ), что уменьшает отношение сигнал/шум на входе ADF4002. С использованием микросхемы ADF4002 частота промежуточной частоты делится на N , а затем выходной сигнал сравнивается с сигналом опорного генератора, генерируя сигнал ошибки по частоте и фазе между двумя сравниваемыми сигналами. Наконец, сигнал ошибки преобразуется в постоянное напряжение с помощью петлевого фильтра 3-го порядка, а затем используется для

управления питанием ЛОВ. Это напряжение используется для стабилизации частоты ЛОВ и управления ею. В первую очередь, при случайном изменении частоты ЛОВ из-за изменения температуры или из-за нестабильного высокого напряжения, напряжение с выхода частотно-фазового детектора изменяется, и частота возвращается к исходному значению. Во-вторых, регулируя частоту опорного генератора, можно изменять выходное напряжение петлевого фильтра, и, следовательно, управлять частотой ЛОВ. Использование генератора (Agilent E8363B) позволяет перестраивать ЛОВ с шагом менее 1 Гц при сохранении полосы пропускания петлевого фильтра.

2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Разработка усовершенствованного синтезатора на основе ЛОВ и ФАПЧ требует, как уже отмечалось, оптимизации противоречивых параметров, таких как фазовый шум, шаг настройки частоты, стабильность и время захвата.

2.1. Стабильность частоты

Выходная частота ЛОВ с фазовой автоподстройкой частоты может быть рассчитана по формуле:

$$f_{\text{BWO}} = f_{\text{ref}} \times N + n \times f_{\text{LO}}, \quad (1)$$

где f_{ref} — частота опорного генератора, f_{LO} — частота гетеродина, N — величина деления обратной связи, n — порядок гармонического смесителя.

Пусть ∂f_{ref} — нестабильность частоты опорного генератора, а ∂f_{LO} — нестабильность частоты гетеродина, (1) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} f_{\text{BWO}} &= (f_{\text{ref}} \pm \partial f_{\text{ref}}) \times N + n \times (f_{\text{LO}} \pm \partial f_{\text{LO}}) = \\ &= f_{\text{ref}} \times N + n \times f_{\text{LO}} \pm (\partial f_{\text{ref}} \times N + n \times \partial f_{\text{LO}}). \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\partial f_{\text{BWO}} = \pm \partial f_{\text{ref}} \times N \pm n \times \partial f_{\text{LO}}.$$

2.2. Шаг частотной перестройки

Выходная частота ЛОВ после стабилизации может быть настроена тремя способами, каждый с различным шагом перестройки частоты. Первый способ — грубая настройка путем настройки микросхемы ADF4002 с помощью компьютера. Этот шаг относится к полосе пропускания петлевого фильтра и не может быть меньше пятикратной ширины полосы петлевого фильтра. Это также сильно влияет на время захвата, поэтому его нельзя значительно уменьшить. Например, если полоса пропускания петлевого фильтра 2 МГц, шаг должен быть > 10 МГц.

Второй способ — это средняя настройка с помощью гетеродина. Шаг перестройки в этом случае равен низшему шагу гетеродина, умноженному на порядок гармонического смесителя.

$$\Delta f_{\text{BWO}} = \Delta f_{\text{LO}} \times n.$$

Третий способ — тонкая настройка с использованием эталонного перестраиваемого генератора. Шаг перестройки в этом случае равен самому низкому шагу генератора опорных сигналов Agilent, который в нашем случае меньше 1 Гц.

2.3. Время захвата

Время захвата — это время, необходимое для генерации частоты с минимальной ошибкой. Другими словами, это время, затраченное на получение желаемой стабильной частоты. Этот параметр зависит от полосы пропускания петлевого фильтра. Время захвата будет порядка секунд, если шаг настройки частоты в 1 Гц был сделан с помощью компьютера, управляющего микросхемой ADF4002. Но когда настройка выполняется с использованием опорного генератора, время уменьшается до микросекунд. Моделирование системы было выполнено с использованием программного обеспечения ADIsimPLL, и оно показывает время захвата 7 мкс, как показано на рис. 2.

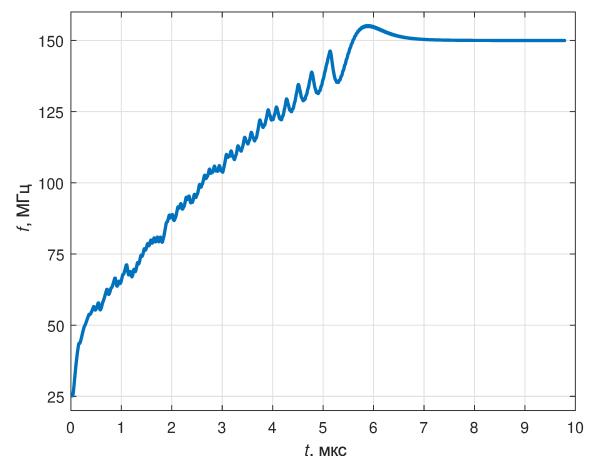


Рис. 2. Время захвата к частоте ПЧ 150 МГц, соответствующей частоте генерации 55.002 ГГц

2.4. Фазовый шум

Учитывая, что фазовый шум является аддитивным [12] и усилители, используемые в обратной связи, являются сверхмаломощными усилителями, плотность мощности фазового шума можно записать как [13]:

$$S_{BWO} = \{N^2 [S_{ref}(\omega) + S_{\varphi PFD}(\omega) + S_{LF}(\omega)]\} \left| \frac{H(j\omega)}{N} \right|^2 + (n^2 S_{LO}(\omega) + S_{mix}(\omega)) \left| \frac{H(j\omega)}{N} \right|^2 + S'_{BWO}(\omega) \left| 1 - \frac{H(j\omega)}{N} \right|^2, \quad (2)$$

где: $H(j\omega)$ — передаточная функция замкнутого контура,

$S_{LO}(\omega)$ — фазовый шум гетеродина,
 $S_{ref}(\omega)$ — фазовый шум опорного генератора,
 $S_{PFD}(\omega)$ — фазовый шум фазочастотного детектора,
 $S_{LF}(\omega)$ — фазовый шум активного фильтра Loop,
 $S_{mix}(\omega)$ — фазовый шум субгармонического смесителя,
 $S'_{BWO}(\omega)$ — фазовый шум свободно работающей ЛОВ.

Опорный генератор (Agilent E8363B) имеет фазовый шум намного меньший, чем гетеродин, $S_{ref}(\omega) \ll S_{LO}(\omega)$, так что величиной $S_{ref}(\omega)$ в выражении (2) можно пренебречь. Более того, поскольку смеситель работает без внешнего смещения, добавляемым им фазовым шумом также можно пренебречь. В итоге, уравнение (2) можно упростить до следующего вида

$$S_{BWO} = \{n^2 S_{LO}(\omega) + N^2 [S_{PFD}(\omega) + S_{LF}(\omega)]\} \left| \frac{H(j\omega)}{N} \right|^2 + S'_{BWO}(\omega) \left| 1 - \frac{H(j\omega)}{N} \right|^2.$$

Член $|H(j\omega)/N|$ равен 1 внутри полосы пропускания петли, и нулю вне её. Это указывает на то, что фазовый шум гетеродина, гармонический порядок смесителя n и значение деления обратной связи N вносят основной вклад в фазовый шум ЛОВ с фазовой автоподстройкой частоты внутри полосы пропускания петли. Это означает, что до тех пор, пока фазовый шум гетеродина низок, использование субгармонического смесителя в обратной связи улучшает фазово-шумовые характеристики системы.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе эксперимента, частота гетеродина была выбрана равной 4.571 ГГц, полоса пропускания петлевого фильтра — 2 МГц, а опорная частота — 30 МГц. С помощью субгармонического смесителя 12-го порядка на выходе была получена частота 55.002 ГГц. Для наблюдения за спектром сигнала к выходу субгармонического смесителя был подключен анализатор спектра Agilent E4405B, который измеряет спектр сигнала

ПЧ 150 МГц, соответствующего частоте 55.002 ГГц. Сначала наблюдался ПЧ-спектр на частоте 150 МГц, соответствующей частоте свободно работающей ЛОВ 55.002 ГГц. Наблюдаемый сигнал был нестабильным и непрерывно перемещался вокруг центральной частоты в интервале частот порядка 1.5 МГц (см. рис. 3).

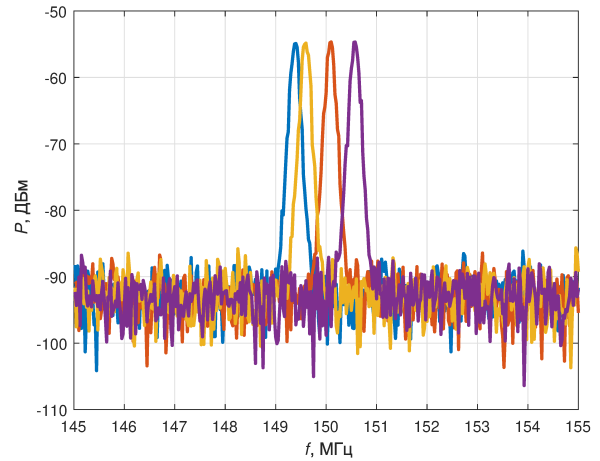


Рис. 3. Спектр ПЧ свободно работающего ЛОВ на центральной частоте 150 МГц, соответствующей частоте 55.002 ГГц

Затем была подключена система, показанная на рис. 1, и наблюдался ПЧ-спектр ЛОВ с фазовой синхронизацией на частоте 150 МГц, что соответствует частоте 55.002 ГГц. Как показано на рис. 4, в отличие от спектра ЛОВ с автономным управлением, спектр ЛОВ с ФАПЧ значительно более стабилен, и спектральная линия генерации ЛОВ более узкая.

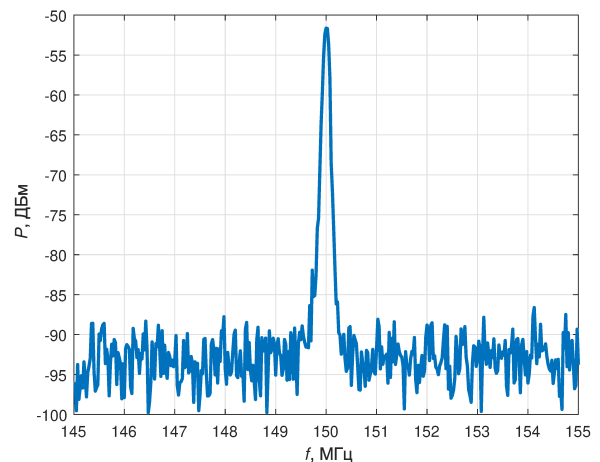


Рис. 4. Спектр ПЧ ЛОВ с фазовой автоподстройкой частоты на центральной частоте 150 МГц, соответствующей частоте 55.002 ГГц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный эксперимент показывает высокий потенциал создания КВЧ-синтезатора на основе ЛОВ с помощью гармонического смесителя, СВЧ-гетеродина

перестраиваемого цифрового генератора и системы ФАПЧ. Этот синтезатор обеспечивает регулировку частоты с малым шагом (1 Гц), который более чем достаточен для измерения электрофизических параметров веществ в высокочастотных открытых резонаторах.

-
- [1] *Badin A.V., Bessonov V. V., Dorozhkin K. V., Dorofeev I. O., Hiu L. B., Dunaevskii G. E.* // IEEE International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2018. P. 1.
- [2] *Karpisz T., Salski B., Kopyt P., Krupka J.* // IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). 2019. P. 1503.
- [3] *Бадьин А.В., Дорофеев И.О., Дунаевский Г.Е.* // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. **58**. № 8–3. С. 121.
- [4] *Dunaevsky G.E., Dorofeev I.O.* From micro- to nano-objects and from giga- to terahertz frequency range: quasi-optical resonant diagnostics of objects // Semiconductor nanotechnology: advances in information and energy processing and storage. Cham: Springer International Publishing AG, 2018.
- [5] *Lin Y.-Y., Chen F.-t., Chen W.-Z.* // International symposium on VLSI design, automation and test (VLSI-DAT), 2020, P. 1.
- [6] *Chen P., Yang C.* // IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI). 2016. P. 479.
- [7] *Shao W., Xu D., Wang Z., Gong H., Tang T., Duan Z., Lu Z., Wei Y., Gong Y., Feng J.* // IEEE 21st International Conference on Vacuum Electronics (IVEC). 2020. P. 219.
- [8] *Pan S., Du C.-H.; Gao Z.-C.; Bao L.-Y., Zhu J.-F., Paoloni C., Liu P.-K.* // International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2018. P. 1.
- [9] *Park Y., Soga Y., Takeda M., Sato M., Kamada K., Fujita T., Okada T., Nishimura Y., Yoshida M.* // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2016. P. 1.
- [10] *Komandin G.A., Chuchupal S.V., Lebedev S.P., Goncharov Y.G., Korolev A.F., Porodinkov O.E., Spektor I.E., Volkov A.A.* // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2013. **3**, N 4. P. 440.
- [11] *Pan S., Du C.-H., Gao Z.-C., Bian H.-Q., Liu P.-K.* // IEEE Transactions on Electron Devices. 2018. **65**, N 8. P. 3466.
- [12] *Demir A.* // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2006. **53**, N 9, P. 1869.
- [13] *Han Y., Zhang Q., Li C., Li X.* // International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP). 2018. P. 185.

Frequency synthesizer in the 55–65 GHz band for working with high-quality resonators

A. Shansho

¹*Department of Radio electronics, Faculty of Radio physics, National Research Tomsk State University
Tomsk 119991, Russia.
E-mail: ahmadsho1@gmail.com*

An inexpensive, high-precision synthesizer with a low level of phase noise was experimentally developed and implemented in the frequency range of 55–65 GHz at a power of 3 mW. The line width was less than 1 Hz, which depends on the line width of the reference frequency generator. Since the frequency of the backward wave oscillator is controlled by changing the input voltage, frequency stabilization has been achieved by using phase locked loop. Stability is determined by the reference oscillator and ranges from 1 Hz (Short-term stability) to 100 Hz (Long-term stability). A low division ratio is required to reduce phase noise, so a sub-harmonic mixer was used to down-convert the high frequency to a low intermediate frequency. The results obtained open up the possibility of measuring the properties of small materials using open resonators and make it possible to create a high-precision stable generator with a low level of phase noise in the terahertz range.

PACS: 84.40.Fe

Keywords: BWO, PLL, open resonators, subharmonic mixer, phase noise, stability.

Received 18 May 2022.

Сведения об авторах

Шаншо Ахмад — аспирант, e-mail: ahmadsho1@gmail.com.