

Оптимизация мощных СВЧ генераторов, стабилизированных диэлектрическими резонаторами, по критерию максимума стабильности частоты и фазы

Глыбин А. А., Колковский Ю. В., Карацуба А. П.

Рассмотрены факторы, определяющие стабильность частоты и фазы мощных СВЧ генераторов. Показано, что применение GaN СВЧ транзистора в мощном СВЧ генераторе, стабилизированном диэлектрическим резонатором, позволяет снизить уровень спектральной плотности фазового шума (СПФШ) на 10 дБ. Разработаны методики конструирования СВЧ твердотельных передатчиков сигналов с высокой стабильностью частоты и фазы, устойчивых к внешним и внутренним климатическим, механическим и электромагнитным воздействиям.

Введение

Стабильность частоты и фазы генерируемых сигналов определяет основные характеристики радиолокационных и связных систем [1,2] такие как:

- дальность обнаружения целей;
- разрешение целей по дальности;
- подавление мешающих отражений от местных предметов и медленно движущихся объектов;
- помехозащищённость и скрытность передачи сигналов радиолокации и связи.

Существенные сложности при формировании сигналов с высокой стабильностью частоты и фазы возникают не только при генерации этих сигналов, но и при их усилении до заданных значений мощности. Эта задача наиболее актуальна при создании мощных твердотельных СВЧ передатчиков, поскольку нелинейные искажения в твердотельных СВЧ приборах существенно больше, чем в электровакуумных СВЧ приборах.

Принципы создания мощных твердотельных СВЧ передатчиков с высокой стабильностью частоты и фазы

Задача построения мощных твердотельных СВЧ передатчиков с высокой стабильностью частоты и фазы должна решаться не только по критерию высокого качества формируемых сигналов, но и с учётом требований по минимизации массогабаритных характеристик аппаратуры при обеспечении устойчивости к внешним дестабилизирующим факторам [3-5].

Зависимость уровня СПФШ сигнала СВЧ генератора $S_\varphi(f_m)$ от параметров эквивалентной схемы СВЧ генератора описывается известной формулой [1]:

$$S_\varphi(f_m) = \left(\frac{f_p}{Q_H \cdot f_m} \right)^2 \cdot K_p \cdot S_{TP}(f_m), \quad (1)$$

где Q_H – величина нагруженной добротности резонатора; K_p – коэффициент усиления СВЧ транзистора автогенератора, компенсирующий потери в резонаторе; $S_{TP}(f_m)$ – спектральная плотность низкочастотного шума активного элемента.

Моделирование параметров СВЧ транзистора в мощном СВЧ генераторе по критерию минимума спектральной плотности шума СВЧ генератора проведено вариацией параметров эквивалентной схемы нагруженного резонатора [3] (рис. 1) в виде последовательного контура с резонансной частотой f_p , эквивалентной индуктивностью

L_p , ёмкостью C_p и сопротивлением R_p . Кроме того, эквивалентная схема учитывает статическую ёмкость резонатора C_0 , импеданс СВЧ транзистора $L_{тр}$, $C_{тр}$ и $R_{тр}$ и согласующее устройство, представляющее собой Г-образный трансформатор импедансов, состоящий из индуктивности L_1 , ёмкости C_1 и активного сопротивления R_1 .

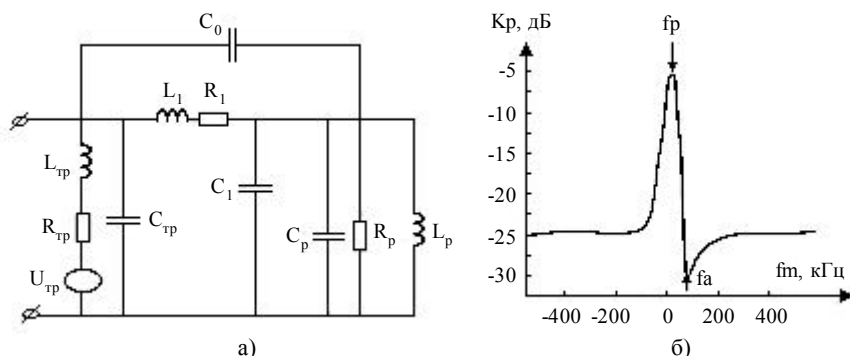


Рис. 1

Эквивалентная схема нагруженного резонатора и его амплитудно-частотная характеристика в СВЧ генераторе с цепями согласования:

а) эквивалентная схема резонатора; б) амплитудно-частотная характеристика диэлектрического резонатора

Анализ показал, что минимизация уровня СПФШ ограничена условием возникновения автоколебаний СВЧ генератора $K_{p\Sigma} \cdot \cos(\varphi_\Sigma) \geq 1$, где $K_{p\Sigma}$ – суммарный коэффициент передачи разомкнутой петли генератора, φ_Σ – суммарный фазовый сдвиг в разомкнутой петле генератора, и условием устойчивой работы в диапазоне рабочих температур ΔT при выполнении соотношения $(f_a - f_p) = L_p C_0^{-1} \ll \delta_T \Delta T$, где δ_T – температурная нестабильность частоты.

Оба эти условия связывают достижимые значения нагруженной добротности резонатора Q_H с импедансом СВЧ транзистора и параметрами эквивалентной схемы диэлектрического резонатора и схем согласования.

Проведён расчёт достижимых значений отношения нагруженной добротности диэлектрического резонатора к ненагруженной добротности Q в зависимости от отношения активных составляющих импеданса транзистора и резонатора для различных значений добротности цепей согласования (рис. 2).

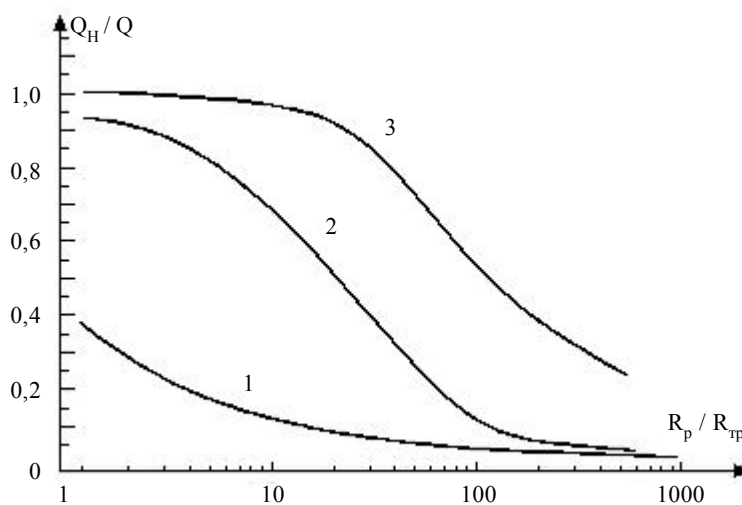


Рис. 2

Зависимости величины отношения нагруженной и ненагруженной добротности резонатора Q_H/Q от отношения активных составляющих импеданса резонатора и транзистора $R_p/R_{тр}$ при различных значениях добротности цепей согласования Q_c : $Q_c = 3$ (1); $Q_c = 30$ (2) и $Q_c = 300$ (3)

Полученные результаты показывают, что чем выше активное сопротивление СВЧ транзистора, тем меньше величина вносимого в контур диэлектрического резонатора сопротивления потерь и соответственно больше величина нагруженной добротности резонатора при одинаковой величине связи резонатора с СВЧ транзистором, выше достижимое значение нагруженной добротности резонатора при одинаковой величине связи резонатора с СВЧ транзистором.

На основании анализа и моделирования проведён выбор типа СВЧ транзистора по критерию минимума спектральной плотности шума СВЧ генератора, стабилизированного диэлектрическим резонатором.

Сравнение расчётных значений активной составляющей последовательного импеданса СВЧ транзистора [6] $r_{тр}$, вносимого в контур диэлектрического резонатора, для GaN и GaAs транзисторов (рис. 3) показывает, что величина вносимого в контур диэлектрического резонатора сопротивления потерь GaN СВЧ транзистора почти на порядок меньше, чем у GaAs СВЧ транзистора.

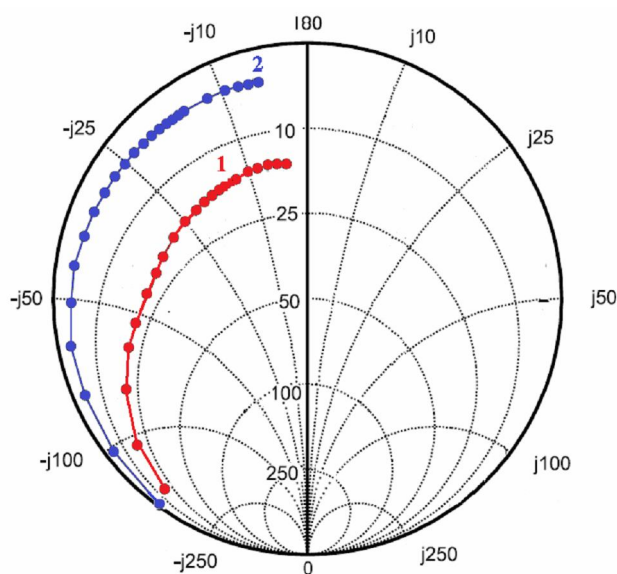


Рис. 3

Сравнение расчётных значений последовательного импеданса GaAs и GaN СВЧ транзисторов в диапазоне частот 0,1-10 ГГц:
1 – импеданс GaAs, 2 – импеданс GaN

Это приводит к большей величине нагруженной добротности при одинаковой величине связи резонатора с СВЧ транзистором и в соответствии с (1) меньшей величине СПФШ.

Уровень СПФШ СВЧ генератора существенно зависит не только от величины нагруженной добротности, но и от уровня низкочастотного шума СВЧ транзистора [5,7], поэтому проведён сравнительный анализ низкочастотных шумов GaN и GaAs транзисторов. Сравнение различных типов СВЧ транзисторов показало, что низкочастотные шумы GaN и GaAs транзисторов отличаются незначительно и находятся достаточно близко к среднеквадратическому отклонению результатов измерений ($\sigma \approx 3$ дБ).

Таким образом, большие величины нагруженной добротности в СВЧ генераторе на GaN транзисторе позволяют выбрать этот тип СВЧ транзистора по критерию минимума спектральной плотности шума СВЧ генератора, стабилизированного диэлектрическим резонатором.

Экспериментальная проверка спектральной плотности фазового шума мощных СВЧ генераторов

Экспериментальная проверка СПФШ мощных ($P = 1$ Вт) СВЧ генераторов на GaN и GaAs транзисторах (рис. 4) показала, что применение GaN СВЧ транзистора в мощном СВЧ генераторе, стабилизированном диэлектрическим резонатором, позволяет снизить уровень спектральной плотности фазового шума более чем на 10 дБ, что обусловлено большей величиной активной части импеданса GaN СВЧ транзистора по сравнению с импедансом GaAs СВЧ транзистора.

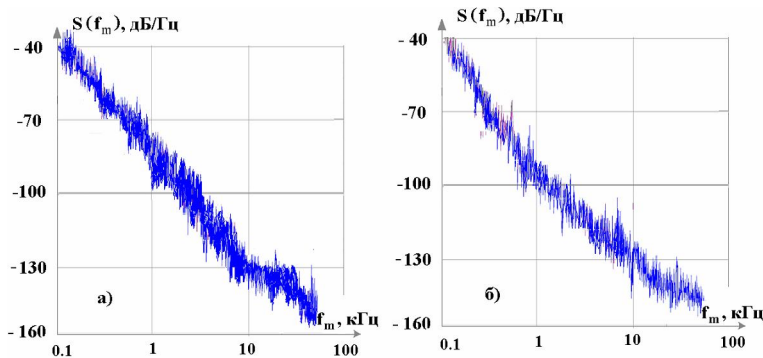


Рис. 4

СПФШ мощных СВЧ генераторов ($P = 1$ Вт) на GaAs и GaN СВЧ транзисторах:
а) GaAs СВЧ транзистор; б) GaN СВЧ транзистор

Разработаны конструктивные и схемотехнические методы обеспечения стабильности частоты и фазы сигнала СВЧ генераторов при воздействии внешних факторов, состоящие в снижении влияния механических воздействий на устойчивость работы СВЧ твердотельных передатчиков [8, 9].

Мощные генераторы с ФАПЧ на GaN СВЧ транзисторах, стабилизированные

диэлектрическими резонаторами, имеют уровень спектральной плотности фазового шума на частоте отстройки $f_m = 2$ кГц менее 130 дБ/Вт (рис. 5).

Исследования виброустойчивости СВЧ формирователя сигналов (рис. 6а) показали, что при механических воздействиях с ускорением до 10 g уровень СПФШ СВЧ формирователя сигналов не изменяется (рис. 6б).

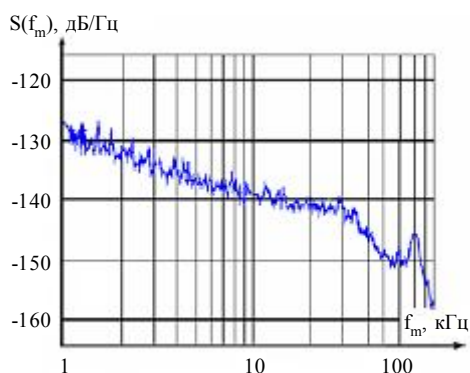


Рис. 5

Зависимость спектральной плотности шума мощных СВЧ генераторов с ФАПЧ, стабилизированных диэлектрическими резонаторами на GaN СВЧ транзисторе



а)

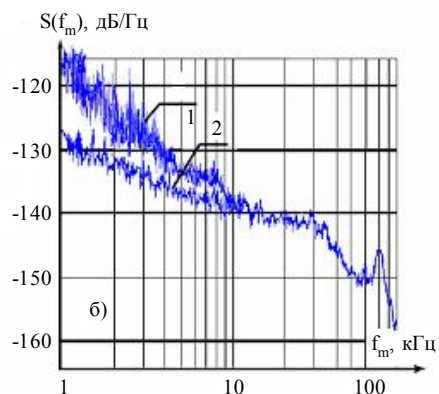


Рис. 6

СВЧ формирователь сигналов, обеспечивающий высокую стабильность частоты и фазы при воздействии шумов и помех – а); результаты измерения СПФШ СВЧ генератора на GaN СВЧ транзисторе, стабилизированного диэлектрическим резонатором, с ФАПЧ при акустическом гармоническом воздействии с частотой 20 Гц мощностью 120 дБ – б): 1 – СПФШ СВЧ генератора на GaAs СВЧ транзисторе; 2 – СПФШ СВЧ генератора на GaN СВЧ транзисторе

Полученные результаты достигаются за счёт применений методов конструктивной защиты опорного кварцевого генератора, СВЧ генераторов с диэлектрическими резонаторами и всей конструкции СВЧ формирователя сигналов.

Разработанный СВЧ формирователь сигналов успешно прошёл испытания на стойкость к внешним воздействующим факторам (механическим, климатическим, акустическим) Комплекса государственных военных стандартов (КГВС) «Мороз-6».

Выводы

1. Установлено, что применение GaN СВЧ транзистора в мощном СВЧ генераторе, стабилизированном диэлектрическим резонатором, позволяет снизить уровень спектральной плотности фазового шума на 10 дБ, что обусловлено большей

величиной активной части импеданса GaN СВЧ транзистора по сравнению с импедансом GaAs СВЧ транзистора, что приводит к меньшей на порядок величине вносимого в контур диэлектрического резонатора сопротивления потерь и соответственно большей величине нагруженной добротности при одинаковой величине связи резонатора с СВЧ транзистором.

2. Разработаны методики конструирования СВЧ твердотельных передатчиков сигналов с высокой стабильностью частоты и фазы, устойчивых к внешним и внутренним климатическим, механическим и электромагнитным воздействиям при минимальных массо-габаритных характеристиках аппаратуры.

Литература

1. Бакулев П. А. Радиолокационные системы // М.: Радиотехника. – 2004. – 524 с.
2. Яценков В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС // М.: Горячая линия – Телеком. – 2005. – 272 с.
3. Головкин А. А. Генераторы высоких и сверхвысоких частот // М.: Высшая школа. – 2003. – 218 с.
4. Э. А. Семёнов, Э. В. Мичурин, В. Н. Посадский. Основные принципы модульного построения и результаты разработок СВЧ-синтезаторов для радиолокационных систем // Радиотехника. – 2002. – № 2. – С. 12-17.
5. А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, Ю. А. Концевой. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках // М.: Техносфера. – 2011. – 416 с.
6. Jie Deng, Weike Wang, Subrata Halder, Walter R. Curtice, James C. M. Hwang, Vinod Adivarahan and M. Asif Khan. Temperature-Dependent RF Large-Signal Model of GaN-Based MOSHFETs // IEEE transactions on microwave theory and techniques. – V. 56. – № 12. – december 2008. – P. 2709.
7. Zhi Hong Liu, Geok Ing Ng and Subramaniam Arulkumar. Analytical Modeling of High-Frequency Noise Including Temperature Effects in GaN HEMTs on High-Resistivity Si Substrates // IEEE transactions on electron devices. – V. 57. – № 7. – july 2010. – P. 1485.
8. А. А. Глыбин, Ю. В. Колковский, М. Н. Гришаков и др. Стабильные твердотельные СВЧ генераторы, устойчивые к воздействию акустического шума // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2007. – Вып. 1(218). – С. 103-108.
9. Патент на изобретение № 2338343. Приоритет 03.06.2007. А. М. Васильев, А. А. Глыбин, Ю. В. Колковский и др.