

Уменьшение фазового шума источников СВЧ-колебаний путем совместного использования автогенераторов и умножителей частоты

В.А. Романюк, Яр Зар Хтун

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Reduction of Phase Noise Microwave Sources by Using Oscillators and Frequency Multipliers

V.A.Romanyuk, Yar Zar Htun

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Проведено сравнение уровня фазового шума источников СВЧ-колебаний, выполненных в виде одиночного автогенератора либо цепочки – низкочастотный автогенератор и умножитель частоты. Показано, что при выполнении определенных условий фазовый шум цепочки оказывается меньше, чем фазовый шум одиночного автогенератора.

Ключевые слова: фазовый шум; автогенератор СВЧ; умножитель частоты.

A comparison of the level of the phase noise of the microwave oscillations, made in the form of a single oscillator or as a chain: the low-frequency oscillator and a frequency multiplier, has been performed. It has been shown that under certain conditions the phase noise of the chain is less than that one of a single oscillator.

Keywords: phase noise; microwave oscillator; frequency multiplier.

В диапазоне СВЧ основным источником электромагнитных колебаний является синтезатор частот, выполняемый на базе автогенераторов, охваченных цепью фазовой автоматической подстройки частоты. Фазовый шум выходных колебаний синтезатора в значительной мере определяется шумами автогенераторов, входящих в его состав: опорного генератора и генератора, управляемого напряжением. Уменьшению фазового шума автогенераторов посвящено много работ, например [1–5].

Рассмотрим возможность уменьшения фазового шума источников СВЧ-колебаний, выполненных в виде автогенераторов, частота которых ниже требуемой, с последующим ее умножением. Цель работы – сравнить фазовые шумы источников электромагнитных колебаний СВЧ путем моделирования и оптимизации их схем в следующих вариантах: одиночный автогенератор требуемой частоты; автогенератор частоты в два раза ниже требуемой и удвоитель частоты; автогенератор частоты в три раза ниже требуемой и утроитель частоты.

В качестве примера рассмотрен источник колебаний частоты 36 ГГц, выполненный на разных транзисторах. Исследование проведено в среде Microwave Office.

Автогенератор выполнен по емкостной трехточечной схеме (рис.1), сток транзистора заземлен по переменному току. В резонаторе, образованном элементами $L1$, $C1$, $C2$, учтены потери мощности путем включения резисторов $R1$ и $R2$ в индуктивную и емкостную ветви колебательного контура. Смещение между затвором и истоком автоматическое, оно образовано

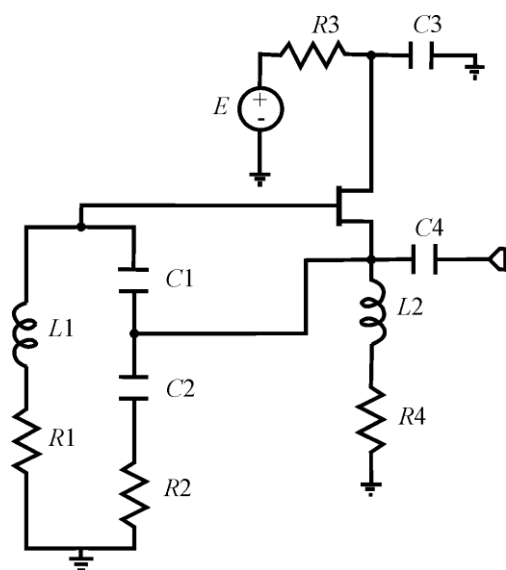


Рис.1. Схема автогенератора

протеканием постоянного тока истока через сопротивление автосмещения $R4$.

Промоделированы три схемы автогенераторов на частоты 36, 18 и 12 ГГц. Схема каждого автогенератора оптимизирована по критерию «минимальная нормированная спектральная плотность мощности фазового шума», выходная мощность каждого автогенератора 5 – 10 дБ. Кроме того, созданы схемы умножителей частоты: удвоитель частоты 18 ГГц и утроитель частоты 12 ГГц.

На рис.2,а показаны зависимости уровня фазового шума от частоты отстройки от несущей, рассчитанные для трех вариантов источников колебаний, выполненных на интегральном транзисторе, представленном моделью ТОМ 1. Фазовый шум одиночных автогенераторов, выполненных на частоты, ниже требуемых, существенно меньше, чем шум автогенераторов заданной частоты (36 ГГц). Особенно

велика разница в уровне фазового шума автогенераторов частот 36 и 12 ГГц (~ 16 дБ при отстройке 1 МГц).

На рис.2,б представлены зависимости нормированной спектральной плотности мощности фазового шума от частоты отстройки, рассчитанные для источников колебаний частоты 36 ГГц, выполненных по схеме автогенератор на транзисторе ТОМ 1 и умножитель частоты. Из рисунка следует, что если уровень фазового шума автогенератора 18 ГГц совместно с удвоителем частоты примерно такой же, как у одиночного автогенератора частоты 36 ГГц, то фазовый шум автогенератора 12 ГГц с утроителем частоты на 6 дБ меньше.

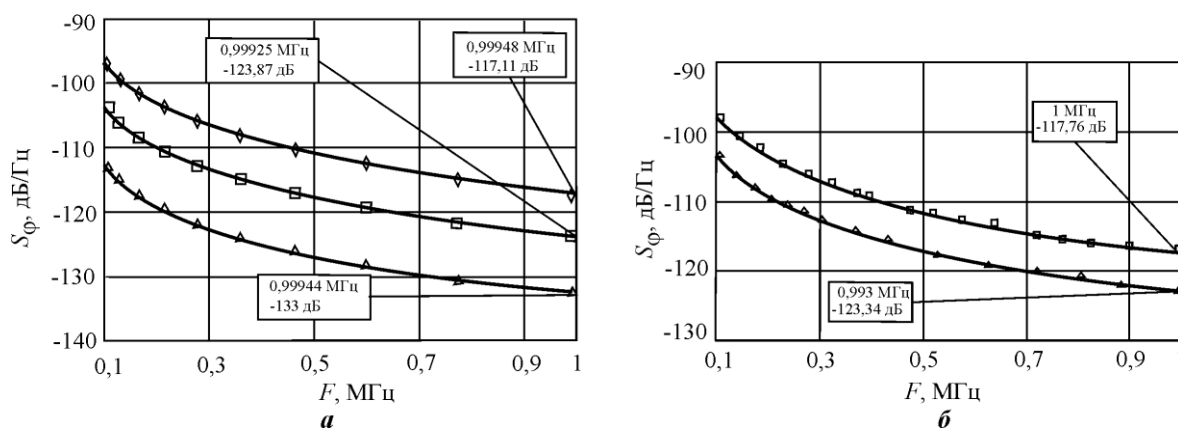


Рис.2. Зависимости спектральной плотности мощности фазового шума от частоты отстройки для источников колебаний частоты 36 ГГц на транзисторе ТОМ 1: а – одиночные автогенераторы (Δ – частота генерации 12 ГГц; □ – 18 ГГц; ◊ – 36 ГГц); б – автогенераторы совместно с умножителями частоты (□ – автогенератор 18х2 ГГц; Δ – автогенератор 12х3 ГГц)

Проведены аналогичные исследования с автогенераторами на других транзисторах. При использовании в автогенераторах более высокочастотного транзистора структуры НЕМТ модели Angelov-2 получены результаты, представленные на рис.3. В данном случае применение автогенератора пониженной частоты совместно с умножителем не привело к уменьшению уровня фазового шума.

Фазовый шум автогенератора во многом определяется преобразованием флуктуаций напряжений на транзисторе в флуктуации частоты. Это происходит благодаря нелинейности характеристик транзистора, главным образом, характеристик его внутренних емкостей.

В автогенераторе (см. рис.1) элементом резонатора является входная емкость транзистора C . Нелинейность этой емкости приводит к изменению генерируемой частоты ω_0 согласно выражению [6]:

$$\frac{\partial \omega}{\omega_0} = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{C} K,$$

где $\frac{\partial C}{C}$ – относительные изменения емкости;

$$K = \frac{p^2 C}{p^2 C + C_K}, \quad (1)$$

p – коэффициент связи емкости транзистора C с колебательным контуром. При случайном изменении относительной входной емкости транзистора $\frac{\partial C}{C}(t)$ так же изменяется фаза колебаний напряжения $\partial \varphi(t) = \int \partial \omega(t) dt$. Спектральная плотность мощности фазового шума S определяется квадратом случайной функции $\partial \varphi(t)$:

$$\partial \varphi^2(t) = \frac{1}{4} \omega_0^2 K^2 \zeta^2(t),$$

где $\zeta(t) = \int \frac{\partial C}{C}(t) dt$.

Если автогенератор выполнен на увеличенную в N раз частоту генерации, то

$$\partial \varphi_1^2(t) = \frac{1}{4} N^2 \omega_0^2 K_1^2 \zeta^2(t).$$

Изменение спектральной плотности мощности фазового шума можно оценить отношением

$$\frac{\partial \varphi_1^2(t)}{\partial \varphi^2(t)} = N^2 \left(\frac{K_1}{K} \right)^2.$$

При этом увеличение фазового шума определяется как

$$\Delta S = 20 \lg N + \Delta \text{ [дБ]}, \quad (2)$$

где $\Delta = 20 \lg \left(\frac{K_1}{K} \right)$.

В соответствии с (1) величина Δ зависит от отношения $\frac{C_K}{p^2 C}$. Выполнение автогенератора на разных транзисторах и разных частотах приводит к изменению этого отношения, поскольку меняется и емкость резонатора, и емкость транзистора.

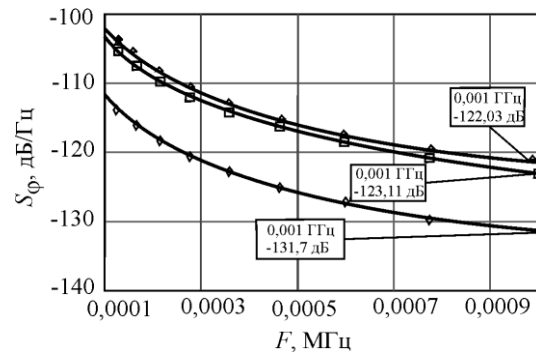


Рис.3. Зависимости спектральной плотности мощности фазового шума от частоты отстройки для источников колебаний на транзисторе модели Angelov-2: \diamond – одиночный автогенератор 12 ГГц; \square – одиночный автогенератор 36 ГГц; Δ – автогенератор 12 ГГц с утроителем частоты

Умножитель частоты в N раз во столько же раз увеличивает флуктуации частоты, и спектральная плотность мощности фазового шума возрастает на $20 \lg N$ дБ. По сравнению с этой величиной другие механизмы увеличения фазового шума множителями дают существенно меньшие добавки. Применимость рассматриваемого метода увеличения фазового шума можно оценить, сравнивая два слагаемых в выражении (2). Фазовый шум источника СВЧ-колебаний можно уменьшить, выполняя автогенератор на пониженную частоту с последующим ее умножением в случае, когда значения $20 \lg N$ и Δ соизмеримы. Если же $\Delta \ll 20 \lg N$, то применение автогенераторов с множителями частоты для уменьшения фазового шума не имеет смысла.

Результаты моделирования в системе Microwave Office показали, что одиночные автогенераторы, выполненные на транзисторах ТОМ 1, отличающиеся по частоте в три раза, имеют фазовые шумы, разница в уровне которых $\Delta \approx 16$ дБ. Эта величина превышает $20 \lg 3$ на 6,5 дБ. Как следует из рис.2, приблизительно на такую величину транзисторный автогенератор частоты в три раза ниже требуемой, меньше шумит, чем одиночный автогенератор требуемой частоты.

При использовании транзисторов Angelov-2 фазовые шумы одиночных автогенераторов частот 36 и 12 ГГц не больше величины $20 \lg 3$ (см. рис.3). Применение источника колебаний в виде автогенератора частоты 12 ГГц и множителя частоты на 3 практически не дает выигрыша в величине фазового шума.

Моделирование схем источников СВЧ-колебаний показало, что возможно уменьшение уровня фазового шума за счет выполнения источника колебаний на частоту, ниже требуемой, с последующим ее умножением. Эта возможность реализуется в том случае, если уровень фазового шума одиночного автогенератора требуемой частоты и более низкочастотного автогенератора отличается на величину, большую $20 \lg N$, где N – отношение частот одиночных автогенераторов.

Литература

1. **Ченакин А.** Фазовые шумы в СВЧ-генераторах. Методы решения проблем // Электроника НТБ. – 2011. – № 4. – С. 52–61.
2. **Горевой А.** Выбор генераторов для построения малощумящих СВЧ-синтезаторов // Компоненты и технологии. – 2012. – № 6. – С. 12–17.
3. Solutions for reducing phase noise at RF and microwave frequencies // Application Note Radar Measurement Series. – 2011. – July 5. – 5990–7529EN. – P. 2–7.
4. **Huang C., Vreede L.C.N, Akhnoukh A., Burghartz J.N.** Low phase noise LC oscillators. – URL: www.ims-chips.de/publication/exe/show_pdfbyid.php/Low_Phase_Noise_LC_Oscillators.pdf?doctype=1&publicationid=630 (дата обращения: 12.03.2015).
5. **Григорьев И.А.** Методы минимизации фазовых шумов в гибридном синтезаторе частоты Ку-диапазона с режимом быстрой перестройки частоты // Радиотехника. – 2012. – № 4. – С. 105–116.
6. **Петров Б.Е., Романюк В.А.** Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах. – М.: Высшая школа, 1989. – 232 с.

Поступило
17 марта 2015 г.

Романюк Виталий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры микроэлектронных радиотехнических устройств и систем (МРТУС) МИЭТ. *Область научных интересов:* полупроводниковые источники электромагнитных колебаний СВЧ.
E-mail: v.a.romanjuk@gmail.com

Яр Зар Хтун – аспирант кафедры МРТУС МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование телекоммуникационных устройств.