

*Ратайко Д.А.*  
*Санкт-Петербургский государственный университет*  
*телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

## **Малошумящий синтезатор частот. Методы построения тракта приведения**

*Общая тенденция развития инфокоммуникационных технологий ведёт к непрерывному возрастанию объемов информации и применению более сложных и изощренных способов кодирования информации. Это приводит к ужесточению требований к качественным показателям систем формирования, передачи, обработки сигналов.*

**Ключевые слова:** Цифровой синтезатор частот, кольцо импульсно-фазовой автоподстройки частоты, тракт приведения, делитель с дробно-переменным коэффициентом деления.

Построение малошумящих синтезаторов СВЧ сигнала позволяет увеличить чувствительность приемных устройств и качество передаваемого сигнала, что приводит к возможности увеличения объема передаваемой информации и расстояния, на которое можно ее передать.

Для формирования сетки частот можно использовать синтезатор на основе колец импульсно-фазовой автоподстройки (ИФАП) частоты либо пассивный синтезатор частот (ПЦС), а для переноса колебания в заданный диапазон частот возможно использование умножающего или синтезаторного кольца ИФАП.[1,2]

Целью данной работы является анализ путей построения малошумящего синтезатора СВЧ сигнала и поиск схемотехнического решения с наименьшими умножениями фазового шума.

Прямое умножение с большой кратностью низкочастотного опорного сигнала нежелательно из-за значительного ухудшения спектрального состава выходного колебания, которое вызвано умножением НЧ помехи (шумовой и дискретной) в  $N$  раз ( $N$  – параметр тракта приведения умножающего кольца ИФАП). Большое влияние на качество сигнала оказывают низкочастотные флуктуации - шумы, приходящие с опорным колебанием - побочные спектральные составляющие.[1]

Рассмотрим варианты построения трактов приведения цифрового синтезатора на основе кольца ИФАП.

На рис.1 приняты следующие обозначения:

ПГ - перестраиваемый генератор; ЧФД - частотно-фазовый детектор; петлевой ФНЧ - фильтр нижних частот, предназначен для фильтрации помех, приходящих с опорной частотой;  $F_S$  – шаг сетки;  $F_{ТП}$  - частота на выходе тракта приведения (входе ЧФД); КА - конечный автомат, цифровое устройство, переключающееся в дискретные моменты времени и имеющее конечное число устойчивых состояний, т.е. обладающее конечной памятью;  $F_{КА}$  - тактовая частота на входе КА;  $R$  - параметр КА, коэффициент передачи по частоте тракта опорного колебания; Упр.1, 2 - цифровые входы (шины) управления операционными узлами синтезатора[2].

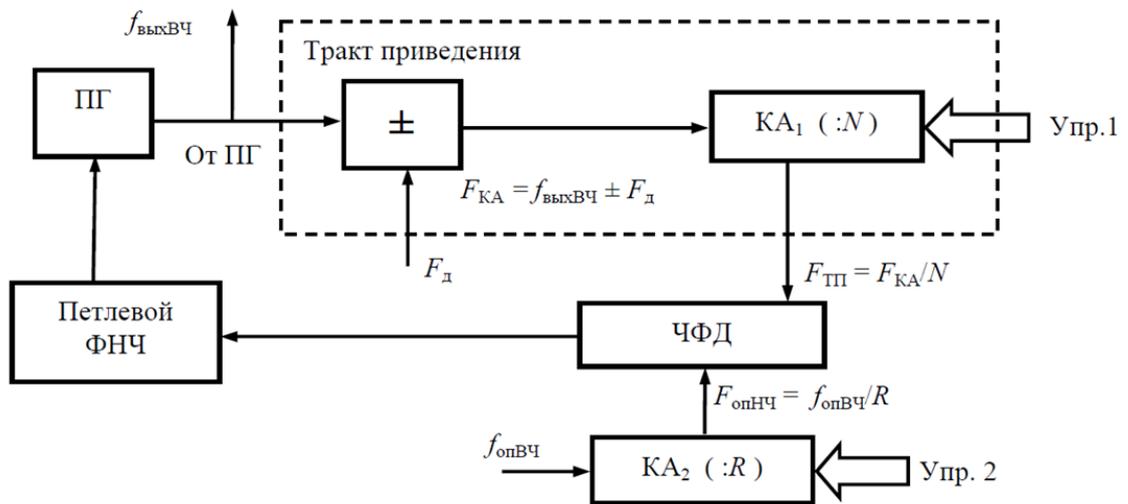


Рис.1

Для удобства сравнения различных вариантов построения ТП введем дополнительные параметры колец ИФАП:

$N_{\Sigma} = f_{\text{выхВЧ}}/F_S$  – эквивалентный коэффициент умножения ТП;

$N_{\text{Ш}} = f_{\text{выхВЧ}}/F_{\text{опНЧ}}$  – коэффициент умножения шумов;

$K_K = N_{\Sigma}/N_{\text{Ш}}$  – коэффициент, характеризующий качество ТП.

При активном цифровом синтезе частот кольцо ИФАП с помощью конечного автомата приводит выходную частоту к опорной частоте таким образом, чтобы выполнялось условие когерентности. Условие квазикогерентности для синтезаторной системы ИФАП можно записать в виде:

$$(\Delta f_{\text{выхВЧ}})/(\Delta F_{\text{опНЧ}}) = (f_{\text{выхВЧ}})/(F_{\text{опВЧ}}) = N,$$

где  $\Delta f_{\text{выхВЧ}}$  и  $\Delta F_{\text{опНЧ}}$  – отклонение частот соответственно опорного и выходного колебания от номинального значения.

В качестве КА обычно используют счетчики импульсов — делители с переменным (целочисленным) коэффициентом деления (ДПКД) или делители с дробно-переменным коэффициентом деления (ДДПКД). Иногда в качестве КА применяют пассивные цифровые синтезаторы частот [1, 3]. При этом коэффициент  $R = P/Q$ , где  $P$  — емкость накапливающего сумматора (НС), его модуль, а  $Q$  — число, записанное на его вход.

Выражение для выходной частоты умножающего (синтезаторного) кольца ИФАП можно записать в виде:  $f_{\text{выхВЧ}} = N * \frac{f_{\text{опВЧ}}}{R} = N * F_{\text{опНЧ}}$

Возможны три варианта построения тракта приведения частоты ПГ к частоте сравнения – аналоговый, цифровой или цифроаналоговый.

В первом случае ТП реализуется в виде аналогового перемножителя — сумматора частот (смесителя). При этом  $N=1$  и кольцо ИФАП является фильтрующим. Его можно использовать для вложения сеток (мелкой сетки в крупную) в рамках структуры системы синтеза частот (ССЧ), а также для переноса колебания синтезируемой частоты в требуемый диапазон [2].

Во втором случае ТП реализуется в виде конечного автомата. Кольцо ИФАП с цифровым ТП является синтезаторным, что позволяет перестраивать выходную частоту с требуемым шагом. КА может быть составным

В третьем случае частота  $F_{\text{КА}}$  понижается с помощью аналогового смесителя. Построение цифроаналоговых ТП осуществляется в СВЧ-диапазонах в тех случаях, когда быстродействие цифровой элементной базы ДПКД недостаточно для приведения частоты  $f_{\text{выхВЧ}}$  к частоте  $F_{\text{опНЧ}}$  [1]. Кроме того, такое построение ТП позволяет уменьшить

коэффициент умножения помех, приходящих с опорным колебанием, что существенно при формировании прецизионных колебаний.

Уровень собственных шумов элементов синтезатора необходимо учитывать при расчете любого кольца ИФАП, так как формирователи импульсов, накапливающие сумматоры, ДПКД (ДДПКД), ЧФД генерируют собственные, как правило, низкочастотные шумы. Эти помехи попадают в полосу прозрачности кольца  $f_{\pi}$  и в полосе расстроек от 0 до  $f_{\pi}$  ухудшают форму спектральной линии выходного колебания.

Логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАХ)  $G_1(s)$  и  $\Phi_{1\nu}(s)$  приведены на рис. 2, где  $f_{и} = 1/T_{и}$  – частота изодромного звена;  $f_{\phi}$  – частота среза петлевого ФНЧ. Единичная крутизна равна 6 дБ/окт или 20 дБ/дек [6].

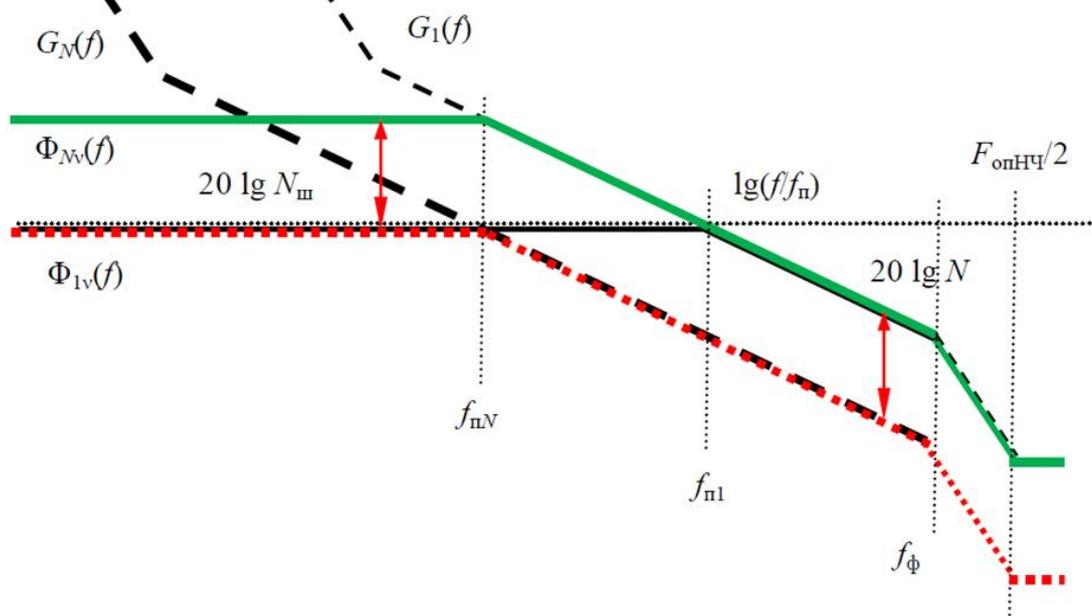


Рис.2

где  $G_1(f)$  – операторный коэффициент передачи разомкнутого кольца с единичной обратной связью ( $N = 1$ );

$$G_N(f) = K_D K_V K_{и}(f) K_{\phi}(f) \frac{1}{sN} = \frac{G_1(s)}{N},$$

$K_D = 1/2\pi$  — статический коэффициент передачи ЧФД;

$K_V = f_{\text{выхВЧ}}^{\text{max}} - f_{\text{выхВЧ}}^{\text{min}} = S_{\text{ПГ}} * E$  – полоса перестройки ПГ,

здесь  $S_{\text{ПГ}}$  – крутизна управляющей характеристики ПГ,

$E$  – размах управляющего напряжения на входе ПГ;

$$K_{и}(f) = \frac{1+fT_{и}}{fT_D} \text{ – операторный коэффициент передачи изодромного звена,}$$

здесь  $T_{и}$  – постоянная времени изодромного звена,

$T_D$  – постоянная времени ЧФД;

$K_{\phi}(f)$  — операторный коэффициент передачи петлевого фильтра нижних частот.

$\Phi_{1\nu}(f)$  - Коэффициент передачи фазовых шумов  $\nu$  опорного сигнала на выход замкнутой системы ИФАП с единичной обратной связью (ОС) можно представить в следующем виде:

$$\Phi_{1\nu}(f) = \frac{\Theta}{\nu} = \frac{G_1(f)}{1+G_1(f)} \quad (1)$$

где  $\Theta$  – фазовые шумы на выходе замкнутого кольца ИФАП.

Анализ рис. 2 и формулы (1) показывает, что для помех, приходящих с опорным колебанием, кольцо ИФАП является фильтром нижних частот с частотой  $f_{\pi}$  и

коэффициентом передачи в полосе прозрачности кольца, равным единице. Иными словами, кольцо ИФАП с единичной ОС не усиливает помехи, приходящие с опорным колебанием. Крутизну следящего фильтра на основе кольца ИФАП можно увеличивать, повышая порядок петлевого ФНЧ, обеспечивая при этом необходимый запас по фазе на частоте  $f_{\Pi}$  [4].

Для умножающего кольца формула (1) изменится:

$$\Phi_{Nv}(s) = \frac{G_1(s)}{1+G_N(s)} = \frac{G_N(s)}{1+G_N(s)} N = \Phi_{1v}(s) * N \quad (2)$$

Из формулы (2), что кольцо ИФАП в  $N_{\text{ш}}$  раз умножает низкочастотные флуктуации опорного колебания, попадающие в полосу его прозрачности  $f_{\Pi}$ ; поэтому необходимо стремиться к минимизации коэффициента деления  $N$  в цепи обратной связи кольца ИФАП. [4]

Рассмотрим способы уменьшения коэффициента умножения помех  $N_{\text{ш}}$  при обеспечении требуемого значения  $F_S$  в диапазоне выходных частот.

Уменьшения  $N_{\text{ш}}$  можно достигнуть введением дробности в ДПКД. В этом случае  $F_S = f_{\text{опвч}}(DR)$ , где  $D$  – значение модуля дробности (емкость НС).

Ограничением величины  $F_S$  (числа разрядов дробности) служит значение полосы прозрачности кольца ИФАП, т.е.  $F_S > f_{\Pi}$ .

Уменьшить коэффициент деления ТП умножающего кольца ИФАП можно не только введением дробности, но и введением дополнительного колебания – частоты  $F_d$ , что позволяет уменьшить требуемое значение  $N_{\text{ш}}$  при сохранении  $N_3$ . Однако при широкополосном синтезе выигрыш от введения частоты  $F_d$  уменьшается.

Возможен другой – нониусный целочисленный – вариант построения тракта приведения цифрового синтезатора частоты (рис. 3). В этом случае частоту  $f_{\text{выхвч}}$  путем деления уменьшают в  $L$  и  $M$  раз, а затем вычитают, получая на выходе смесителя разностную частоту  $F_{\text{опнч}}$ . Коэффициент  $N_{\text{ш}}$  становится меньше коэффициента  $N_3$ . В этом случае частота опорного колебания умножается в  $LM$  раз, а помехи, приходящие с опорным колебанием, – в  $M$  раз ( $M > L$ ). Одновременно величина  $F_S$  возрастает в  $K_K$  раз и становится неравномерной по диапазону. При таком варианте построения ТП коэффициент шума по верхней оценке практически не изменяется (по сравнению с классическим ТП на основе ДПКД), но эквивалентный коэффициент деления  $N_3$  увеличится в соответствии с выражением [5]:

$$N_3 = \frac{LM}{L-M}; N_{\text{ш}} = \max\{L, M\}; K_K = \min\{L, M\}$$

Наибольший практический интерес представляет случай  $M = L + 1$ , тогда  $N_3 = LM = L(L + 1)$ ,  $N_{\text{ш}} = L + 1$ ,  $K_K = L$ . Нониусный ТП можно видоизменить путем введения дробности в одну из его ветвей. Примем коэффициент деления первого нониусного делителя равным  $N$ , а коэффициент второго (дробного) нониусного делителя — равным  $N + 1/N$ . При этом [6]:

$$N_{\text{ш}} = N + \frac{1}{N} \approx N, \quad N_3 = N(N^2 + 1), \quad K_K = \frac{N(N^2 + 1)}{N + 1/N} = N^2$$

Результаты анализа рассмотренных вариантов построения тракта приведения кольца ИФАП позволяют сделать следующие выводы:

- все дополнительные колебания, вводимые в синтезаторное кольцо ИФАП, должны быть когерентны опорному колебанию;
- введение частоты  $F_d$  в тракт приведения позволяет уменьшить коэффициент умножения помех, приходящих с опорным колебанием, в пределах до величины, при этом  $N_3 \equiv N_{\text{ш}}$ ;

— использование нониусного целочисленного преобразования в ТП позволяет уменьшить коэффициент умножения помех, приходящих с опорным колебанием, при сохранении заданного коэффициента деления, при этом  $N_9 > N_{ш}$ ;

— применение нониусного дробного ТП позволяет значительно уменьшить коэффициент умножения помех, попадающих в полосу прозрачности кольца ИФАП.

#### Библиографический список

1. Зарецкий М. М., Мовшович М. Е. Синтезаторы частоты с кольцом фазовой автоподстройки. Л.: Энергия, 1974. 256 с
2. Никитин Ю. А. Частотный метод анализа синтезаторной системы импульсно-фазовой автоподстройки частоты. Часть 3 // Современная электроника. 2007. № 9. С. 68—73.
3. Рыжков А. В., Попов В. Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
4. Никитин Ю.А. Частотный метод анализа синтезаторной системы импульсно-фазовой автоподстройки частоты // Современная электроника. – 2007. №4, 5, 6, 8, 9. – 2008. №1.
5. Никитин Ю.А. Анализ целочисленного нониусного тракта приведения умножающего кольца импульсно-фазовой автоподстройки частоты. // Известия вузов России. Серия Радиозлектроника. 2011. № 6. С. 58 – 65.
6. Никитин Ю.А. Анализ дробного нониусного тракта приведения умножающего кольца импульсно-фазовой автоподстройки частоты. // Известия вузов России. Серия Радиозлектроника. 2012. № 1. С. 31 – 37.