

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ИСТОЧНИКОВ ШУМА В СИНТЕЗАТОРАХ ЧАСТОТ НА БАЗЕ ФАПЧ

© 2016 г. А.А. ЗАЙЦЕВ

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Зеленоград

Введение

В составе многих современных интегральных схем (ИС) для получения широкого диапазона частот используют синтезаторы сетки частот (ССЧ) на базе контура фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Одной из основных характеристик ССЧ является величина фазового шума выходного сигнала. В фазовый шум аддитивно входят случайная и регулярная составляющие. Случайная составляющая вызывается действующими в элементах контура ФАПЧ шумовыми эффектами, обусловленными комбинацией термодинамического (теплового и дробового) и низкочастотного (фликкер) шумов. Регулярная составляющая свидетельствует о наличии регулярных помех. В докладе рассматриваются передаточные функции источников фазового шума в ССЧ на базе контура ФАПЧ в окрестности частоты полосы пропускания контура и приводятся рекомендации по уменьшению результирующего фазового шума в выходном сигнале.

Аналитическая модель ССЧ на базе ФАПЧ с источниками шума

Типовая структурная схема ССЧ на базе контура ФАПЧ, представлена на рис. 1 [1,2]. Выходные сигналы блока ИЧФД управляют блоком ИТНЗ, формируя на его выходе импульсы тока I_0 , длительность и полярность которых пропорциональны фазовой разности сигналов опорной частоты F_{REF} и частоты обратной связи F_{CNT} . Импульсы тока I_0 поступают в блок ПФ, где преобразуются в управляющее напряжение V_{VCO} для автоматической подстройки частоты и фазы выходного сигнала F_{VCO} блока ГУН. Для формирования сигнала частоты обратной связи F_{CNT} частота F_{VCO} делится на коэффициент N в блоке ДЧ. В результате выходная частота F_{VCO} равна NF_{REF} .

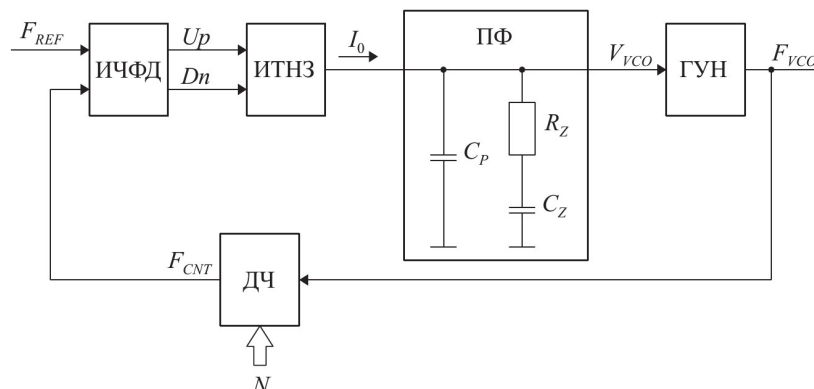


Рис. 1. Типовая структурная схема ССЧ на базе ФАПЧ: ИЧФД - импульсный частотно-фазовый детектор; ИТНЗ - источник тока накачки заряда; ПФ - петлевой фильтр; ГУН - генератор, управляемый напряжением; ДЧ - делитель частоты.

При заданных значениях тока I_0 , коэффициента деления N и крутизне передаточной характеристики блока ГУН K_{VCO} требуемая частота ω_0 единичного усиления ра-

замкнутого контура и запас по фазе обеспечиваются соответствующим импедансом $Z_{LF}(s)$ блока ПФ [1,2]. Импеданс блока ПФ рис. 1 равен:

$$Z_{LF}(s) = \frac{s + \omega_Z}{sC_p(s + \omega_p)},$$

где частота нуля $\omega_Z = \frac{1}{R_Z C_Z}$ и частота полюса $\omega_p = \omega_Z \frac{C_Z + C_p}{C_p}$.

Частота ω_{0LF} на которой ПФ имеет максимальный запас по фазе φ_{0LF} до значения -90° равна: $\omega_{0LF} = \sqrt{\omega_Z \omega_p}$. Значение максимального запаса по фазе φ_{0LF} равно:

$$\varphi_{0LF} = \arcsin \frac{\omega_p - \omega_Z}{\omega_p + \omega_Z}.$$

Для обеспечения максимально возможного запаса по фазе замкнутого контура ФАПЧ необходимо, чтобы частота ω_0 единичного усиления разомкнутого контура была равна частоте ω_{0LF} блока ПФ. В этом случае для φ_{0LF} от 45° до 70° частота полосы пропускания замкнутого контура по уровню -3дБ может быть определена с погрешностью не более $\pm 5\%$ как: $\sqrt{2} \omega_{0LF} \frac{\omega_p}{\omega_p - \omega_Z}$.

Как представлено на аналитической модели рис. 2, выходной шум $\theta_{OUT}(s)$ является результатом взаимодействия различных источников шума, подключенных к выходам блоков контура ФАПЧ [1,2]. Вид и амплитуда результирующего шума зависят от амплитуды и передаточной функции каждого источника шума к выходу схемы.

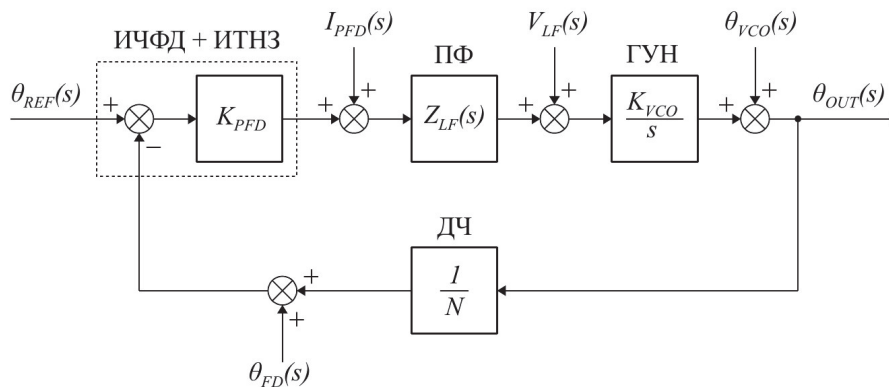


Рис. 2. Аналитическая модель ССЧ на базе ФАПЧ с источниками шума.

Передаточные функции блоков аналитической модели обозначены как: K_{PFD} - передаточная функция, совместно формируемая блоками ИЧФД и ИТНЗ; $Z_{LF}(s)$ - импеданс ПФ; K_{VCO} - крутизна передаточной характеристики ГУН; $1/N$ - коэффициент передачи блока ДЧ. Источники шума обозначены как: $\theta_{REF}(s)$ - фазовый шум сигнала опорной частоты; $I_{PFD}(s)$ - результирующий ток шума блоков ИЧФД и ИТНЗ; $V_{LF}(s)$ - напряжение шума элементов ПФ; $\theta_{VCO}(s)$ - фазовый шум выходного сигнала ГУН; $\theta_{FD}(s)$ - фазовый шум ДЧ. Кроме указанных источников шума на все элементы схемы воздействуют помехи по цепям питания и по подложке кристалла ИС, возникающие вследствие работы других блоков ИС.

Передаточные функции источников шума

В табл. 1 представлены передаточные функции от источников шума к выходному шуму, где $G_{OL}(s)$ - передаточная функция разомкнутого контура ФАПЧ [1,2]:

$$G_{OL}(s) = \frac{K_{PFD} Z_{LF}(s) K_{VCO}}{sN}.$$

Таблица 1

| Источник шума | Передаточная функция | | АЧХ передаточной функции |
|--------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------|
| Источник опорной частоты | $\frac{\theta_{OUT}(s)}{\theta_{REF}(s)}$ | $N \cdot \frac{G_{OL}(s)}{1 + G_{OL}(s)}$ | ФНЧ |
| ИЧФД+ИТНЗ | $\frac{\theta_{OUT}(s)}{I_{PDF}(s)}$ | $\frac{N}{K_{PFD}} \cdot \frac{G_{OL}(s)}{1 + G_{OL}(s)}$ | ФНЧ |
| ПФ | $\frac{\theta_{OUT}(s)}{V_{LF}(s)}$ | $\frac{K_{VCO}}{s} \cdot \frac{1}{1 + G_{OL}(s)}$ | Полосовой фильтр |
| ГУН | $\frac{\theta_{OUT}(s)}{\theta_{VCO}(s)}$ | $\frac{1}{1 + G_{OL}(s)}$ | ФВЧ |
| ДЧ | $\frac{\theta_{OUT}(s)}{\theta_{FD}(s)}$ | $-N \cdot \frac{G_{OL}(s)}{1 + G_{OL}(s)}$ | ФНЧ |

Однако амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) передаточных функций источников шума в окрестности частоты ω_0 в литературе исследованы недостаточно.

Обратимся к рис. 3. Для шума источника опорной частоты, блоков ИЧФД, ИТНЗ и ДЧ контур ФАПЧ является фильтром низкой частоты (ФНЧ) 2-го порядка. Причем между частотами ω_0 и ω_P АЧХ имеют наклон -20 дБ/дек и только выше частоты ω_P шум подавляется с наклоном -40 дБ/дек. На частотах ниже ω_0 шум от этих источников передается на выход схемы с усилением прямо пропорциональным коэффициенту N блока ДЧ.

Для шума элементов блока ПФ контур ФАПЧ является полосовым фильтром 2-го порядка с подавлением по -20дБ/дек. Амплитуда максимума передаточной функции прямо пропорциональна K_{VCO} блока ГУН и обратно пропорциональна частоте ω_0 и ширине интервала между частотами ω_Z и ω_P . Частота максимума амплитуды передаточной функции, находящаяся между частотами ω_Z и ω_0 , также зависит от ширины интервала ω_Z и ω_P . Чем ближе расположены ω_Z и ω_P , тем дальше частота максимума смещается от частоты геометрического среднего частот ω_Z и ω_0 в направлении частоты ω_0 . Для используемого в практике запаса по фазе φ_{0LF} блока ПФ выше 45° представленные выражения для значений амплитуды и частоты максимума передаточной функции имеют погрешность менее 15%. Численно уменьшение интервала частот ω_Z и ω_P и увеличение амплитуды максимума имеют разную степень проявления – сокращение интервала в 2 раза приводит к увеличению амплитуды не более чем на 20%.

Для фазового шума выходного сигнала блока ГУН контур является фильтром высокой частоты (ФВЧ) 2-го порядка и на частотах выше ω_0 фазовый шум ГУН передается на выход приблизительно с коэффициентом единица. Между частотами ω_Z и ω_0 АЧХ передаточной функции имеет наклон -20дБ/дек, ниже частоты ω_Z -40дБ/дек.

Из литературы известны рекомендации для уменьшения фазового шума выходного сигнала ССЧ. В дополнение к максимально возможному уменьшению уровня помех по подложке ИС и цепям питания и уменьшению чувствительности элементов контура к этим помехам, необходимо: устанавливать максимально возможную частоту ω_0 при выполнении условия равенства фазового шума блока ГУН и суммарного значения фазовых шумов других источников, а также условия устойчивости контура; использовать максимально возможное значение выходного тока I_0 блока ИТНЗ; минимизировать крутизну передаточной характеристики K_{VCO} блока ГУН и коэффициент деления N блока ДЧ [2–4].

К этому следует добавить рекомендацию сближать частоты ω_Z и ω_P блока ПФ для сужения диапазона, где передаточные функции шумов блоков ИЧФД, ИТНЗ и ГУН имеют наклон -20дБ/дек. Однако необходимо учитывать при этом уменьшение запаса по фазе φ_{0LF} блока ПФ и, соответственно, контура в целом.

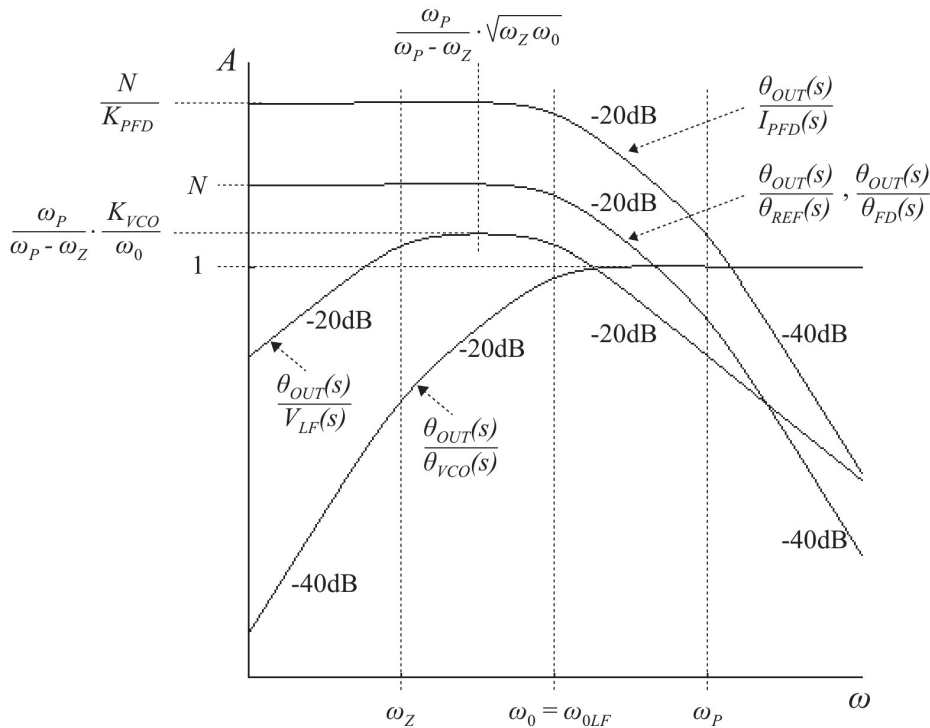


Рис. 3. АЧХ передаточных функций источников шума.

Заключение

Уточнены АЧХ передаточных функций источников шума ССЧ на базе контура ФАПЧ в интервале частот от ω_Z до ω_P блока ПФ. Между частотами ω_Z и ω_0 передаточная функция шума блока ГУН имеет наклон -20дБ/дек . Между частотами ω_0 и ω_P передаточные функции шума источника опорной частоты, блоков ИЧФД, ИТНЗ и ДЧ имеют наклон -20дБ/дек . Кроме известной зависимости амплитуды передаточной функции блока ПФ от K_{VCO} и ω_0 , также установлена обратно пропорциональная зависимость от ширины интервала между частотами ω_Z и ω_P . При этом уменьшение интервала ω_Z и ω_P хотя и приводит к увеличению амплитуды, но численно меньшему, чем уменьшение интервала. Таким образом, в дополнение к известным из литературы рекомендациям для уменьшения фазового шума выходного сигнала ССЧ, можно добавить необходимость сближать частоты ω_Z и ω_P блока ПФ, но при этом учитывать сопутствующее уменьшение запаса по фазе φ_{0LF} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keliu Shu, Edgar Sanchez-Sinencio. CMOS PLL Synthesizers: Analysis and Design. – Springer Science, 2005. – 216 p.
2. Syed Irfan Ahmed. Submicron CMOS Components for PLL-based Frequency Synthesis // Diss. of MAppSc degree / Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada. – 2002. – 223 p.
3. Chang-Hyeon Lee, Jack Cornish, Kelly McClellan, John Choma. Design of low jitter PLL for clock generator with supply noise insensitive VCO // International Symposium on Circuits and Systems. 31 May - 3 Jun 1998. Monterey, CA, USA. – 1998. – Vol. 1. – P. 233 – 236.
4. Kyoohyun Lim, Chan-Hong Park, Dal-Soo Kim, Beomsup Kim. A Low-Noise Phase-Locked Loop Design by Loop Bandwidth Optimization // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2000. – Vol. 35. – № 6. – P. 807 – 815.