



# СВЧ СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТ В МИКРОЭЛЕКТРОННОМ ИСПОЛНЕНИИ

## MICROWAVE FREQUENCY SYNTHESIZER EXECUTED IN MICROELECTRONIC CIRCUITS

УДК 621.376.4

МАРТИРОСОВ ВЛАДИМИР ЕРВАНДОВИЧ  
*Imarti\_ve@mail.ru*

MARTIROSOV VLADIMIR E.  
*Imarti\_ve@mail.ru*

АЛЕКСЕЕВ ГЕОРГИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

ALEKSEEV GEORGIY A.

*Московский авиационный институт  
 (национальный исследовательский университет)  
 Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., 4*

*Moscow Aviation Institute (National Research University)  
 4 Volokolamskoe Highway, Moscow, 125993, Russia*

Исследованы вопросы разработки СВЧ синтезатора частот в микроэлектронном исполнении. Показана эффективность структуры синтезатора на основе метода косвенного синтеза и оптимизированной по комплексному критерию качества: максимизация диапазона частот синхронизации, минимизация времени дискретной перестройки по частоте и минимизация фазовых шумов формируемого СВЧ колебания.

*Ключевые слова: СВЧ синтезатор частот; метод косвенного синтеза; фазовый портрет системы синхронизации; высокие динамические характеристики; эффективное подавление фазовых шумов; микроэлектронное исполнение.*

The paper describes problems of developing of a microwave frequency synthesizer in microelectronic design. The efficiency of the synthesizer structure of indirect synthesis method optimized for the complex quality criterion — maximization of the synchronization frequency range, minimization of the discrete frequency tuning time and minimization of the phase noise of the generated microwave oscillation — has been shown.

*Keywords: microwave frequency synthesizer; synchronization system phase portrait; high dynamic characteristics; effective suppression of phase noise; microelectronic design*

Синхронные технологии формирования и приема сигналов, основанные на использовании системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), являются эффективным инструментарием при создании современных радиосистем различного назначения. В частности, системы ФАПЧ применяются в составе оптимальных квазикогерентных структур модуляторов и демодуляторов дискретных сигналов типа PSK, QPSK и многопозиционных QAM, а также в синтезаторах частот, выполненных методами косвенного синтеза [1].

Современные технические решения при создании формирователей высокочастотных колебаний — синтезаторов частот можно классифицировать по следующим основным направлениям, достоинства и ограничения которых достаточно полно изложены в литературе:

- Формирование высокочастотных колебаний с привлечением цифрового вычислительного синтезатора, известного в технической литературе как **синтезатор прямого цифрового синтеза** (*direct digital synthesizer — DDS*). В основе данной технологии лежит процессорное алгоритмическое формирование отсчетов колебания и последующее применение цифро-аналогового преобразования и аналоговой фильтрации для получения выходного колебания синтезатора.
- **Метод прямого аналогового синтеза** (*direct analog synthesis — DAS*), при котором осуществляется формирование сигнала высокостабильным эталонным генератором на пониженной частоте и последующее преобразование в выходное СВЧ колебание синтезатора с привлечением гетеродина, смесителя и фильтра для устранения побочных продуктов преобразования частоты.

- Использование **метода косвенного синтеза**, выполненного на основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) (*Phase Locked Loop — PLL*). В этом случае выходное колебание синтезатора формируется высокочастотным генератором, охваченным через делители частоты петель ФАПЧ с привязкой по частоте и фазе к высокостабильному эталонному генератору, работающему на пониженной частоте.

При разработке современных СВЧ радиотехнических систем к параметрам используемых в них синтезаторов частот может быть предъявлен комплекс жестких, а зачастую и конфликтных требований, основные из которых можно сформулировать следующим образом:

- значительный (вплоть до октавного) диапазон дискретной перестройки частоты выходного колебания в СВЧ диапазоне частот;
- высокое быстродействие (не более десятка микросекунд) дискретной перестройки частоты синтезатора в рабочем диапазоне частот;
- низкий уровень фазовых шумов и побочных дискретных продуктов в спектре выходного колебания СВЧ синтезатора.

С учетом СВЧ диапазона частот и сформулированных выше требований при разработке синтезатора частот были совместно использованы методы прямого цифрового и косвенного синтеза, основанные на инновационных структурных решениях защищенных патентом РФ на изобретение [2]. Структурная схема разработанного СВЧ синтезатора частот представлена на рис. 1.

В качестве источника эталонного колебания использована структура DDS, обеспечивающая высокую стабильность, сверхмалый дискретный шаг перестройки, малый уровень

фазовых шумов и неразрывность фазы в процессе перестройки по частоте на этапе формирования эталонного колебания. Формирование выходного колебания синтезатора частот осуществляется инновационной петлей ФАПЧ, содержащей две параллельно работающие ветви управления частотой подстраиваемого генератора (ПГ).

Первая ветвь управления частотой ПГ — традиционная астатическая аналоговая ветвь, включающая в себя фазовый детектор (ФД), коммутатор полярности (КП) напряжения, интегратор ( $\int$ ) с регулирующим его коэффициентом передачи множителем ( $k_2$ ) и сумматор напряжений ( $\Sigma$ ).

Вторая ветвь управления частотой ПГ — цифровая ветвь, обеспечивающая сверхскоростную дискретную перестройку частоты ПГ с целью устранения частотного рассогласования на входе ФД в широком диапазоне начальных частотных расстроек. В ее составе: многоразрядный двоичный делитель частоты ( $f/m$ ), фазовращатель на  $\pi/2$ , синхронный детектор (СД), пороговые устройства ( $ПУ_1$  и  $ПУ_2$ ), логическая схема «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» ( $=1$ ), формирователь импульсов (ФИ), линия задержки (ЛЗ), реверсивный счетчик (РС) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП).

Выходное напряжение ЦАП через сумматор напряжений обеспечивает ступенчатую регулировку частоты подстраиваемого генератора в сторону снижения текущего частотного рассогласования в моменты перехода через нулевой уровень напряжения с выхода СД.

Цифровая ветвь управления частотой ПГ работает только при наличии колебания биений на выходе детекторов ФАПЧ, т. е. в режиме начальной синхронизации и дискретной перестройки частоты синтезатора. После высокоскоростного устранения значительной части начальной частотной расстройки, когда аналоговая ветвь управления начинает процесс установления фазы и биения на выходах детекторов исчезают, цифровая ветвь автоматически замораживает код реверсивного счетчика и, соответственно, напряжение на выходе ЦАП.

Формирование счетных импульсов реверсивного счетчика осуществляется два раза на периоде при пересечении нулевого уровня колебанием биений с выхода СД, что с учетом многоразрядности РС и ЦАП обеспечивает высокую скорость синхронизации системы ФАПЧ в широком диапазоне начальной частотной расстройки сигналов на входах фазового детектора. Блоки линии задержки и логической схемы «исключающее ИЛИ», совместно, позволяют оценивать полярность текущей частотной расстройки и управлять полярностью счета РС в сторону сближения частот колебаний на входах детекторов. Более подробное описание работы структуры можно найти в материалах патента [2].

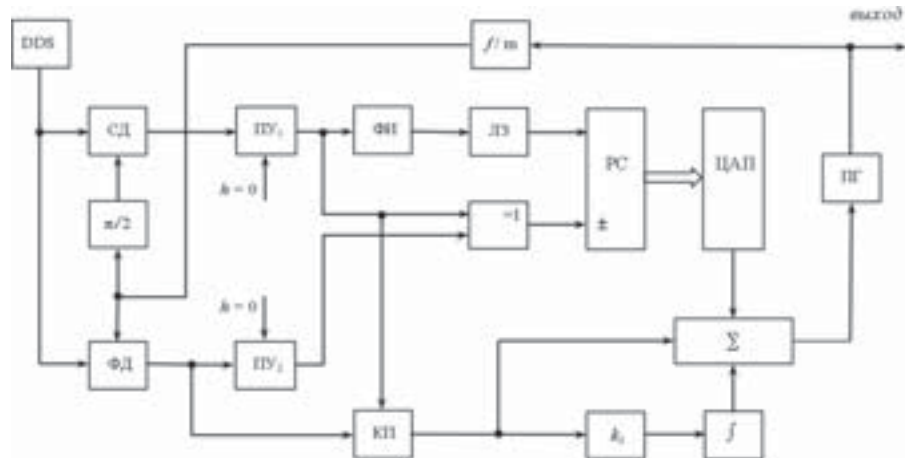


Рис. 1. Структурная схема СВЧ синтезатора частот

Высокие динамические характеристики разработанного СВЧ синтезатора частот можно оценить по фазовому портрету, полученному методами математического моделирования в программной среде MATLAB/Simulink и представленному на рис. 2. По оси ординат фазового портрета проведена нормировка с привлечением коэффициента петлевого усиления ( $K_{ФАПЧ}$ ) аналоговой петли регулирования в ФАПЧ.

Заметим, что фазовый портрет системы синхронизации второго идеального порядка может быть получен либо путем решения нелинейного дифференциального уравнения, описывающего исследуемую структуру, что весьма проблематично без введения определенных математических ограничений и приближений, либо путем совместного моделирования математических моделей функциональных блоков системы, что и было проделано в данном случае.

Движение «изображающей точки» по фазовому портрету (соответствующей динамике переходного процесса в системе синхронизации) происходит ускоренно и монотонно к точкам равновесия системы (точкам синхронного режима работы), имеющим координаты  $\Delta\varphi_i = \pm i\pi$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$  на оси абсцисс фазового портрета. Такая форма портрета обусловлена двумя факторами. Первый — инверсия полярности выходного напряжения ФД на интервалах фазового рассогласования  $\Delta\varphi = (\pi/2 \div 3\pi/2) \pm i\pi$ ,

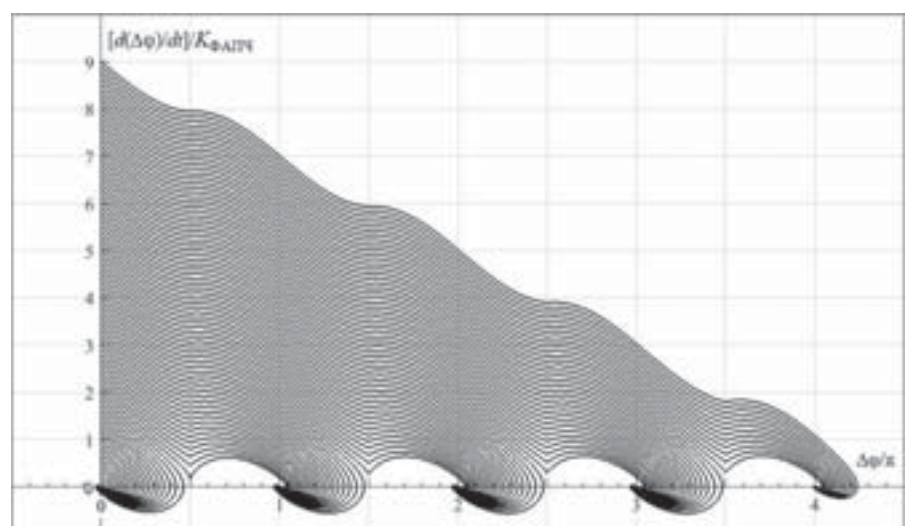


Рис. 2. Фазовый портрет СВЧ синтезатора частот



$i = 0, 1, 2, \dots$  с помощью коммутатора (КП) полярности напряжения на выходе ФД. Второй — формирование дискретного ступенчатого напряжения на выходе ЦАП (равного максимальному размаху дискриминационной характеристики ФД) в моменты прохождения изображающей точки через фазовое рассогласование, равное  $\Delta\varphi_i = (\pi/2) \pm i\pi, i = 0, 1, 2, \dots$ . Подчеркнем, что описанные факторы формирования фазового портрета синтезатора частот обусловлены его структурой, приведенной на рис. 1.

Проведенное по результатам исследований сравнение динамических характеристик разработанной структуры синтезатора частот со структурой, содержащей только традиционную астатическую ветвь регулирования частотой ПГ, показало, что снижение времени начальной синхронизации и дискретной перестройки частоты ПГ при значительных начальных расстройках частот достигает величин в несколько порядков. Эти результаты получены как аналитическим путем, так и методами математического моделирования в программной среде MATLAB/Simulink. При этом расхождение теоретических расчетных значений и оценок, полученных методами математического моделирования, не превышает 2–3%.

Также отметим, что уровень фазовых шумов формируемого в СВЧ синтезаторе колебания при использовании метода косвенного синтеза определяется фазовыми шумами эталонного колебания (в данном случае DDS) и степенью подавления аналоговой петлей ФАПЧ шумов собственных компонентов.

Рассмотренная выше структура и результаты исследования ее характеристик использованы в проводимой в МАИ

в настоящее время СЧ ОКР по разработке микросхем СВЧ синтезаторов частот. Работы проводятся по заказу предприятия НИИМА «Прогресс» в рамках государственного контракта НИИМА с Минпромторгом РФ (шифр работы «Многоцветник-И2-РК-МАИ»).

На текущем этапе выполнения СЧ ОКР методами математического моделирования структурных алгоритмов разрабатываемого СВЧ синтезатора частот подтверждены основные характеристики технического задания, а именно: рабочий диапазон дискретной перестройки частоты 3,2–6,4 ГГц, максимальное время дискретной перестройки частоты — не более 5 мкс, уровень фазовых шумов в ближней от значения частоты выходного колебания синтезатора зоне — не хуже 134 дБн/Гц (при отстройке на 100 кГц и 250 кГц), 130 дБн/Гц (при отстройке на 1,0 МГц) и 138 дБн/Гц (при отстройке на 2,0 МГц).

В заключение отметим, что представленные материалы аргументируют высокую эффективность использования разработанной структуры СВЧ синтезатора частот в современных и перспективных радиотехнических системах различного назначения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мартиросов В.Е. Оптимальный прием дискретных сигналов ЦСПИ. М.: Радиотехника, 2010. — 208 с.
2. Патент РФ на изобретение № 2595629. Синтезатор частот / Мартиросов В.Е., Алексеев Г.А. / ФИПС, Бюл. № 24 от 27.08.2016.

## НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 1600 руб.

### НАСТОЛЬНАЯ КНИГА ИНЖЕНЕРА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДОВЫХ МЕТОДИК ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ

Джоэль П. Дансмор

Издание осуществлено при поддержке Keysight Technologies

М: ТЕХНОСФЕРА, 2018. — 736 с.  
ISBN 978-5-94836-505-3

За последние четверть века в радиоэлектронной промышленности произошли революционные изменения, и немаловажную роль в этих переменах сыграла техника сверхвысоких частот. Успех разработки устройств СВЧ-диапазона непосредственно связан с качеством и широтой возможностей по анализу их параметров. Автор книги — инженер-разработчик с 30-летним стажем — работал над широчайшим кругом измерительных задач в СВЧ-диапазоне — от компонентов сотового телефона до спутниковых мультиплексоров.

Написанная им книга — это совокупность основ и передового опыта, теории и практики, в центре внимания которой — измерения активных и пассивных устройств с использованием новейших методик векторного анализа цепей, в том числе конфигурации современных векторных анализаторов цепей, методики их калибровки, подходы к анализу полученных результатов измерений, неопределенностей и составляющих систематической погрешности. Значительная часть книги посвящена описанию наглядных практических примеров измерений параметров таких устройств, как кабели и соединители, линии передачи, фильтры, направленные ответвители, усилители и смесители, балансные устройства и пр.

Книга станет прекрасным практическим руководством для инженеров-метрологов и разработчиков ВЧ-/СВЧ-устройств.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; ☎ +7 (495) 956-3346; ✉ knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru