

УДК 621.396.662

ПРЯМОЙ ЦИФРОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТЫ С ДЕЛЬТА-СИГМА ФАЗОВОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИЕЙ

А.И. ПОЛИКАРОВСКИХ

*Одесская национальная академия связи имени О.С.Попова
ул. Ковальська, 1, Одесса, 65045, Украина*

Поступила в редакцию 19 марта 2014

Рассмотрен дельта-сигма вычислительный синтезатор прямого синтеза с фазовой интерполяцией. Фазовая интерполяция выполнена с помощью интегратора на единичном конденсаторе и цифро-аналоговом преобразователе. Дельта-сигма преобразование обеспечивает высокую разрешающую способность по частоте и низкий шум квантования на выходе прямого цифрового синтезатора частоты. Промоделирована работа такого синтезатора, что подтвердило высокие качественные характеристики синтезированных сигналов.

Ключевые слова: вычислительный синтезатор частоты, фазовая интерполяция, фазовый шум, дельта-сигма модуляция.

Введение

Прямые цифровые синтезаторы частоты играют важную роль в современных радиоэлектронных устройствах. Это обеспечивается многими значительными преимуществами таких синтезаторов: скоростью перестройки частоты, высокой разрешающей способностью, широкой синтезированной полосой частот. Многоуровневые DDS в силу своей технологичности, надежности, возможности микроминиатюризации и уникальности технических характеристик (неразрывность фазы во время переключения с частоты на частоту, возможность формирования сигналов сложной формы, цифровое управление амплитудой, частотой и фазой исходного колебания) на сегодня нашли широкое применение в системах связи. Одним из основных параметров синтезаторов частоты является относительная спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов, которая измеряется при разных значениях частоты отстройки от опорного колебания.

Типичный ЦВС (цифровой вычислительный синтезатор – DDS) состоит из фазового аккумулятора [1], постоянного запоминающего устройства со значениями преобразования фаза-амплитуда и цифро-аналогового преобразователя. Фазовый аккумулятор превращает значение входного слова синтезированной частоты в значение фазы синтезированного сигнала. После чего постоянное запоминающее устройство превращает отсчеты фазы в отсчеты амплитуды выходного сигнала. Уровень искажений выходного сигнала значительно возрастает вследствие операции отсечения фазового слова синтезатора, которое проводится из-за невозможности использования в синтезаторах больших объемов постоянного запоминающего устройства по ряду причин: стоимость, большая потребляемая мощность, площадь, которую будет занимать такой синтезатор, низкое быстродействие считывания значения отсчетов амплитуды из ПЗУ. Для уменьшения размера ПЗУ используют целый ряд техник, которые подробно описаны в [2].

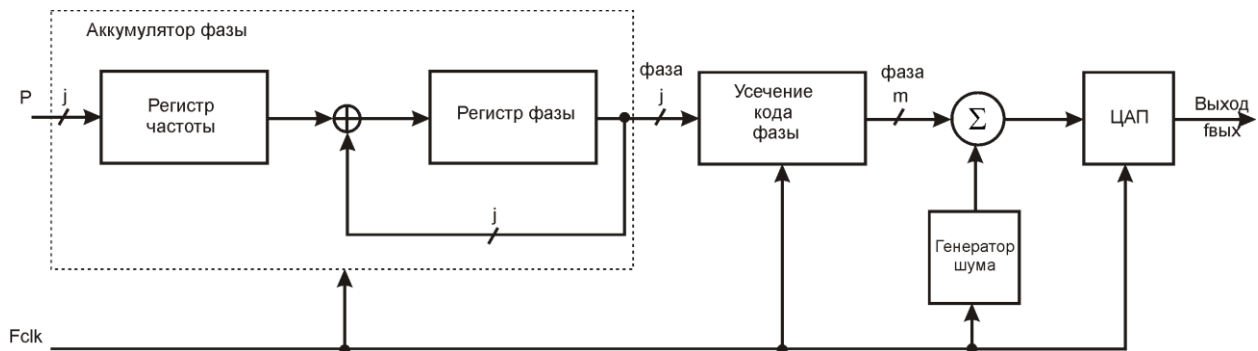


Рис. 1. Структурная схема синтезатора с псевдошумовым генератором для компенсации периодической составляющей отсечения фазового слова

Другим подходом для уменьшения уровней боковых синтезированных колебаний является использование псевдошумовых генераторов, сигналы которых прибавляются к фазовому слову синтезатора (рис. 1).

Относительно новым подходом к уменьшению боковых составляющих считается использование ЦВС с фазовой интерполяцией. В этом случае фазовый аккумулятор направляет значение фазы в генератор задержки. Генератор задержки задерживает исходный сигнал пропорционально величине фазовой ошибки относительно возникновения сигнала переноса фазового аккумулятора. Такой синтезатор будет иметь высокие показатели максимальной синтезированной частоты с малым значением потребляемой мощности вследствие отказа от преобразователя фаза-амплитуда.

Результаты и их обсуждение

Необходимо рассмотреть структурные элементы прямых цифровых синтезаторов частоты, которые позволят уменьшить фазовую нестабильность положения импульсов переполнения фазового аккумулятора. В работе поставлены следующие цели:

- исследовать структурные элементы прямых цифровых синтезаторов частоты, которые приводят к фазовой нестабильности положения импульсов переполнения фазового аккумулятора;
- разработать математические модели фазовых аккумуляторов прямых цифровых синтезаторов частоты и структур, которые уменьшат фазовую нестабильность выходного сигнала синтезатора;
- исследовать с помощью разработанной математической модели шумовые характеристики ЦВС.

На рис. 2 представлена структурная схема ЦВС с интерполяцией положения фазовых импульсов. Он состоит из фазового интерполятора, который управляется исходным словом фазового аккумулятора. Шаг фазового интерполятора пропорционален $\frac{2\pi}{2^{N_a}}$, где N_a – разрядность фазового аккумулятора. Каждый тактовый цикл аккумулятор фазы прибавляет постоянное значение к своему выходу, соответственно задержка фазового интерполятора возрастает с ростом значения фазового аккумулятора.

Временная диаграмма на рис. 3 описывает работу фазового интерполятора. Аккумулятор фазы возрастает с каждым тактовым импульсом Clk на величину P . Тогда задержка фазового интерполятора будет пропорциональной значению фазы фазового аккумулятора. Когда сигнал переноса формируется в фазовом аккумуляторе, выход фазового интерполятора должен быть задержан для каждого такта $Clk(i)$ фазы $\varphi_A + 2\pi$ или $Clk(i+1)$ фазы φ_A . Для того чтобы ликвидировать двусмысленность переходы через полный цикл 2π , сигнал Clk_2 формируется из сигнала Clk с удалением $Clk(i)$ импульса.

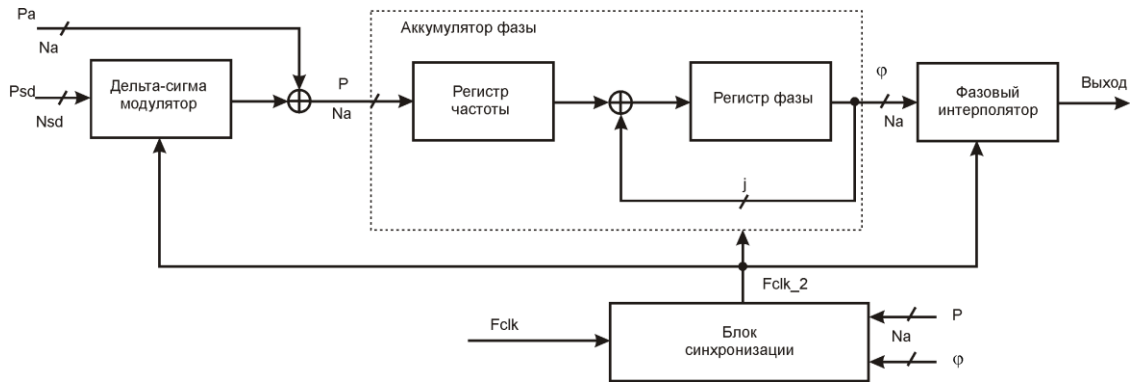


Рис. 2. Структурная схема прямого цифрового синтезатора с дельта-сигма интерполятором фазы

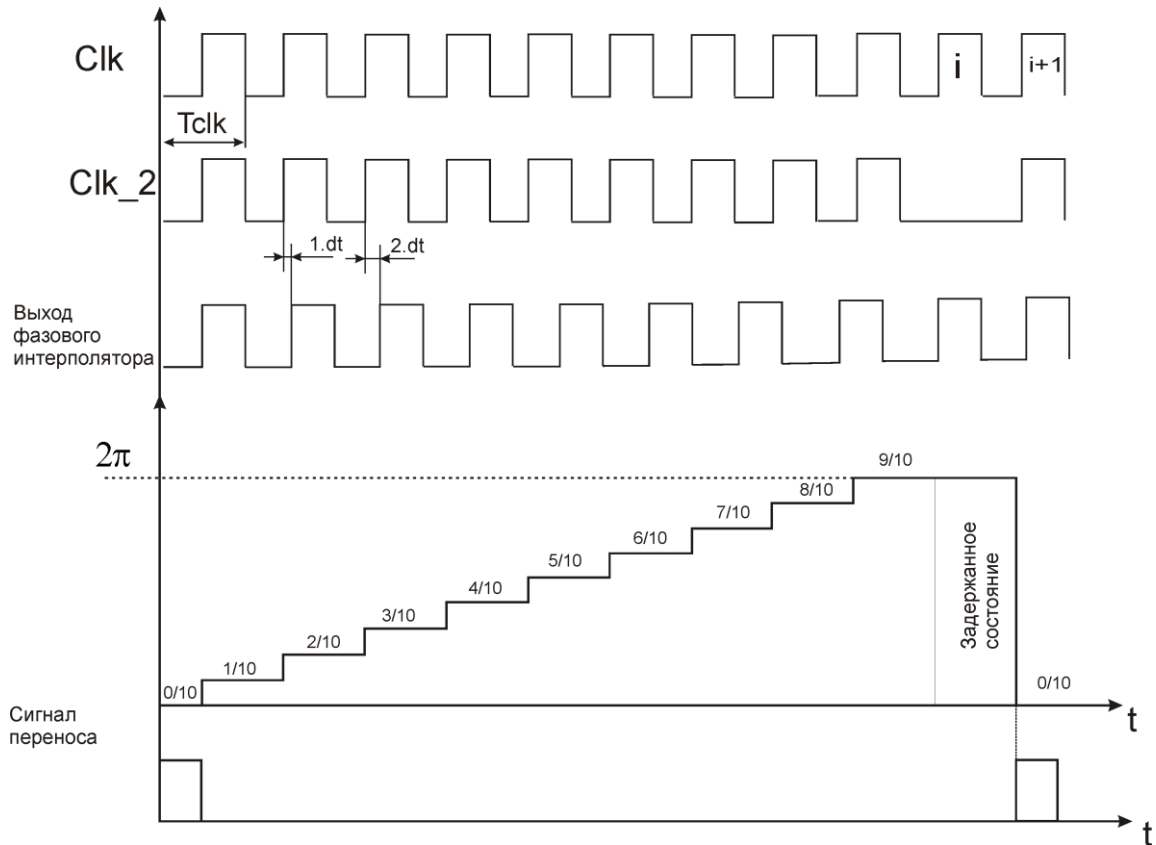


Рис. 3. Временная диаграмма работы прямого цифрового синтезатора с интерполятором фазы

Таким образом, синтезированный период может быть записан следующим образом:

$$T = T_{clk} + dt. \quad (1)$$

Временной прирост может быть представлен как

$$\frac{dt}{T_{clk}} = \frac{\varphi_A}{2\pi} = \frac{P}{2^{N_a}}. \quad (2)$$

Исходная частота импульсов ЦВС тогда может быть вычислена методом подстановки (2) в (1):

$$f_{out} = \frac{f_{clk}}{1 + \frac{P}{2^{N_a}}}. \quad (3)$$

Рост разрешающей способности синтезатора по частоте может быть обеспечен увеличением разрядности фазового аккумулятора или дельта – сигма модуляцией значения P [3]. Применение дельта-сигма модуляторов приводит к росту потребляемой мощности

синтезатором. Кроме того дельта-сигма модуляция подавляет шумы квантования в полосе синтезированного сигнала [4].

Чем выше частота тактирования, тем выше находится полоса подавления и тем легче выполнить фильтрацию. Использование дельта-сигма модулятора как показано на рис. 2, позволяет представить фазу P которая состоит из двух частей: P_a – как целая часть значения фазы и P_{sd} – как дробовое значение фазы. P_{sd} – это величина которая имеет знак и меняется в пределах $-2^{sd} \dots +2^{sd}$. Изберем в качестве дельта-сигма модулятора 2-х модулятор MASH11 [5]. То есть значение выхода дельта-сигма модулятора будет находиться в пределах -3 и 3 . Тогда уравнение (3) можно преобразовать в (4):

$$f_{out} = \frac{f_{clk}}{1 + \frac{P_a + \frac{P_{sd}}{2^{N_{sd}-1}}}{2^{N_a}}} \quad (4)$$

Фазовый интерполятор состоит из интегратора двойного наклона на единичном конденсаторе для предотвращения несогласования и минимизации площади интегратора, см. рис. 4. Интерполятор функционирует следующим образом: 1 – конденсатор C – разряженный, 2 – происходит зарядка током V_c , 3 – после этого происходит сбрасывание заряда конденсатора, после появления сигнала переноса на выходе аккумулятора, для предотвращения перехода через значение 2π . Для того чтобы реализовать все функции фазового интерполятора блок логики на рис 4. должен функционировать на частоте в 4 раза выше чем синтезированный сигнал. Значение наклона кривой интегрирования можно вычислить из (5), где K лежит в пределах от 0 до $2^{N_a} - 1$:

$$V = \int_0^{T_{clk}} \frac{I_v}{C} dt = \int_0^{T_{clk}} \frac{K \cdot I_0}{C} dt = K \cdot \frac{I_0}{C} \cdot T_{clk} \quad (5)$$

Постоянная наклона формируется, когда все источники тока цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) переключатся и напряжение будет пропорциональным:

$$V_c = \int_0^{\Delta T_i} \frac{I_c}{C} dt = \int_0^{\Delta T_i} \frac{(2^{N_a-1}) \cdot I_0}{C} dt = (2^{N_a-1}) \cdot \frac{I_0}{C} \cdot \Delta T_i \quad (6)$$

Напряжение на конденсаторе уравнивается с напряжением источника питания в момент времени $T_{clk} + \Delta T_i$ когда напряжение питания равно

$$V_{пит} = (2^{N_a-1}) \cdot \frac{I_0}{C} \cdot T_{clk} \quad (7)$$

Подстановка (5), (6) и (7) приводит к

$$\Delta T_i = \frac{(2^{N_a} - 1) - K}{2^{N_a} - 1} \cdot T_{clk} \quad (8)$$

То есть ΔT_i представляет собой время интерполяции и оно ограничено периодом тактовой частоты T_{clk} .

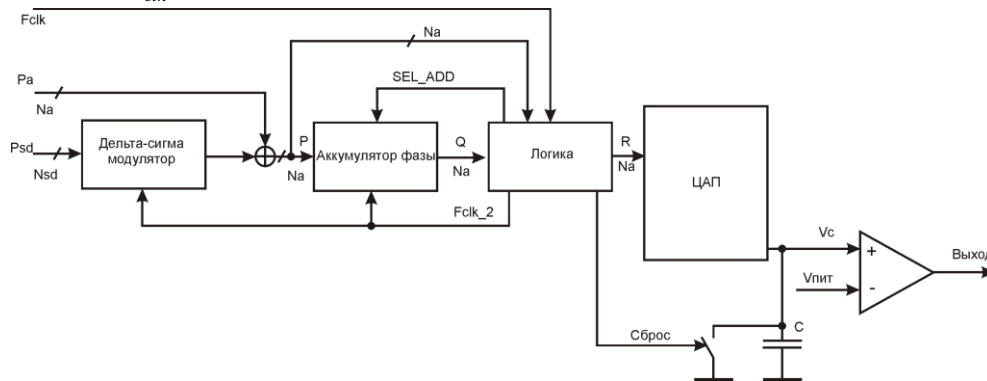


Рис. 4. Детализированная структурная схема прямого цифрового синтезатора с дельта-сигма интерполятором фазы

Выходная тактовая частота прямого цифрового вычислительного синтезатора частоты составляет

$$f_{out} = \frac{f_{clk}}{1 + \frac{P_a + \frac{P_{sd}}{2^{N_{sd}-1}}}{(2^{N_a} - 1) \cdot 4}} \quad (9)$$

Тем не менее, для того чтобы не возникала ошибка перехода фазы сигнала через 2π , фазовый аккумулятор был модифицирован так как это показано на рис. 5.

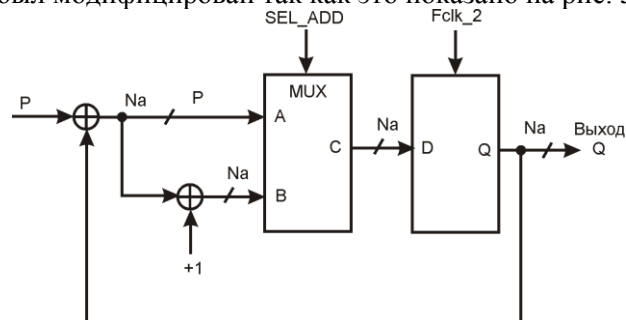


Рис. 5. Структурная схема прямого цифрового синтезатора с выбором слагаемых

Моделирование предложенной схемы прямого цифрового синтезатора с дельта-сигма интерполятором в среде NI Multisim 10.0 дало возможность проанализировать параметры синтезатора. В качестве опорного генератора был избран тактовый генератор в 1 ГГц. Тогда теоретически максимальная синтезируемая частота составит 250 МГц. Сильный фазовый шум $-40...45$ дБ – наблюдается в диапазоне частот $10...40$ МГц. Подавление боковых составляющих на частоте синтезированного сигнала в 100 МГц – 65 дБ.

Заключение

Рассмотрены структурные элементы прямых цифровых синтезаторов частоты, которые позволят уменьшить фазовую нестабильность положения импульсов переполнения фазового аккумулятора цифровых вычислительных синтезаторов. Исследованы структурные элементы прямых цифровых синтезаторов частоты, которые приводят к фазовой нестабильности положения импульсов переполнения фазового аккумулятора. Разработаны математические модели фазовых аккумуляторов прямых цифровых синтезаторов частоты и структур, которые уменьшат фазовую нестабильность исходного сигнала синтезатора. Было проведено исследование фазовых шумов предложенной структуры синтезатора с помощью разработанной математической модели шумовых характеристик ЦВС. Показано, что использование фазового интерполятора с дельта-сигма модулятором дает возможность уменьшить потребляемую мощность синтезатора, уменьшить площадь синтезатора в интегральном исполнении. Моделирование в специализированных САПР даст возможность более детально оценить параметры синтезированных сигналов и четко определить сферу применения подобных синтезаторов.

DELTA-SIGMA PHASE INTERPOLATION DIRECT DIGITAL FREQUENCY SYNTHESIZER

O.I. POLIKAROVSKYKH

Abstract

We consider the delta sigma direct computer synthesizer direct synthesis of phase interpolation. The phase interpolation is performed using a single capacitor integrator and digital-to-analog converters. Delta-sigma conversion of distinguished ability provides high frequency and low noise quantization the output direct digital frequency synthesizer. Simulated operation of the synthesizer, confirmed the high quality features of the synthesized signals.

Список литературы

1. *Макаренко В.* // Электронные компоненты и системы. 2010. № 1. С. 34–46
2. *Vankka J.* Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications. Helsinki, 2000.
3. *Полікаровських О.І.* // Вісник Хмельницького національного університету. Хмельницький, 2013. Том. 2. С. 171–175.
4. *Полікаровських О.І.* // Інформаційні технології. 2013. Том. 4. С. 142–146
5. *Norsworthy S.R.* Delta-sigma Data Converters: Theory, Design, Simulation. Wiley, 1996.