

## **Алгоритмы структурного проектирования малошумящих формирователей сигналов для систем дистанционного зондирования Земли**

В.В. Ромашов, К.А. Якименко, Л.В. Ромашова, А.Н. Докторов

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых", E-mail:romashovmirom@mail.ru*

*В данной работе представлены алгоритмы структурного проектирования формирователей сигналов, построенных по различным методам синтеза. Алгоритмы позволяют рассчитать основные частотные соотношения в структуре синтезаторов, выбрать те соотношения, при которых достигается наименьший уровень фазовых шумов, провести математическое моделирование и анализ шумовых характеристик.*

*This paper presents algorithms for structural design of signal generators based on various synthesis methods. Algorithms allow to calculate the main frequency ratios in the structure of synthesizers, select those ratios that achieve the lowest level of phase noise, conduct mathematical modeling and analysis of noise characteristics.*

### **Введение**

Среди систем дистанционного зондирования Земли космического базирования наиболее распространенными в настоящее время являются системы, поддерживающие оптический метод получения снимков земной поверхности. Такие системы отличаются относительной простотой конструкции и высокой разрешающей способностью. Однако существенным недостатком таких систем является зависимость от метеорологических условий и времени суток. Этому недостатка лишены системы ДЗЗ, поддерживающие радиолокационный метод получения информации о земной поверхности [1–3]. Спутниковые радиолокаторы позволяют проводить съемку вне зависимости от погоды и освещенности, при этом обеспечивать пространственное разрешение менее метра.

Качественные характеристики изображений, полученных спутниковыми радиолокаторами, напрямую зависят как от внешних факторов (например, нестабильность траектории носителя, влияние притяжения космических объектов и др.), так и от ряда технических параметров радиолокатора: от диаграммы направленности антенны до выбранного диапазона рабочих частот. Известно, что наилучшую разрешающую способность обеспечивают радиолокационные системы ДЗЗ, работающие в S-диапазоне (3,1–3,3 ГГц), C-диапазоне (5,25–5,57 ГГц), X-диапазоне (8,025–8,625 ГГц). Кроме того, на качество получаемых изображений напрямую влияют характеристики формирователя сигналов (уровень собственных фазовых шумов и побочных составляющих спектра), косвенное влияние оказывает скорость перестройки по частоте.

Целью данной работы является разработка алгоритмов построения формирователей сигналов для систем ДЗЗ, обзор методов анализа их шумовых характеристик, разработка программного обеспечения для структурного проектирования и анализа шумовых характеристик синтезаторов частот.

### **Алгоритмы структурного проектирования синтезаторов и анализа их шумовых характеристик**

В настоящее время известны прямой и косвенный методы синтеза частот [4, 5]. Прямой метод, в свою очередь, подразделяется на прямой аналоговый и прямой цифровой методы синтеза. Синтезаторы косвенного метода синтеза реализованы на

основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [6]. Синтезаторы прямого цифрового метода синтеза в русской литературе получили название – цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС) [7]. Синтезаторы, построенные по каждому из названных методов синтеза, обладают как достоинствами, так и недостатками. Снизить влияние недостатков позволяет гибридный метод синтеза [8, 9], представляющий собой комбинации составных элементов синтезаторов вышеназванных методов. Наибольшую популярность получили гибридные синтезаторы частот (ГСЧ) на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза. Такие синтезаторы обладают малым количеством нежелательных дискретных составляющих спектра выходного сигнала, обеспечивают широкий диапазон выходных частот и малый шаг перестройки по частоте.

На этапе проектирования формирователя сигналов, перед разработчиком ставится ряд проблем. Во-первых, необходимо выбрать, по какому методу синтеза будет построен формирователь. Основными критериями данного выбора, как правило, служат требования к скорости перестройки, допустимому уровню нежелательных побочных составляющих спектра, поддерживаемым типам модуляции и др. После выбора метода, необходимо рассчитать частотные соотношения в структуре синтезатора. Причем, для некоторых синтезаторов (например, гибридных) требуемые выходные частоты можно получить при различных вариантах частотных соотношений. Общее число таких вариантов может достигать нескольких тысяч, и разработчик должен выбрать самый оптимальный из этих вариантов. Авторы предлагают использовать в качестве критерия оптимальности уровень фазовых шумов, который оценивается спектральной плотностью мощности (СПМ) фазовых шумов в зависимости от частоты отстройки от несущей.

Для анализа шумовых характеристик используются математические модели СПМ фазовых шумов, представленные в виде степенных полиномов [10–14]. Такие модели позволяют рассчитать уровень СПМ фазовых шумов для любого значения выходной и опорной частоты. Математическая модель СПМ фазовых шумов ЦВС имеет вид [13]:

$$S_{\text{ЦВС}}(F) = (K_{\text{ЦВС}})^2 \left( \frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4} \right) + 10^{k_3} + S_{\text{кв}}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{ЦВС}} = f_{\text{ЦВС}}/f_T$  – коэффициент передачи ЦВС;  $f_{\text{ЦВС}}$  – основная частота ЦВС; коэффициенты  $k_1, k_2, k_3, k_4$  определяют уровень СПМ  $1/F^2$  шума,  $1/F$  шума, естественной шумовой составляющей входных цепей ЦАП и естественной шумовой составляющей сопротивления нагрузки, соответственно;  $S_{\text{кв}} = 2^{-2N_{\text{ЦАП}} - 0,59} \left( \frac{f_{\text{ЦВС}}}{f_T} \right)^2$  – СПМ фазового шума квантования ЦАП;  $F$  – частота отстройки;  $N_{\text{ЦАП}}$  – число разрядов ЦАП ЦВС.

Математическая модель СПМ фазовых шумов синтезаторов на основе ФАПЧ имеет вид:

$$S_{\text{ФАПЧ}}(F) = \left[ \frac{S_{\text{ГОЧ}}(F)}{N_1^2} + S_{\text{ДЧ1}}(F) + S_{\text{ФД}}(F) + S_{\text{ФНЧ}}(F) + S_{\text{ДЧ2}}(F) \right] \cdot |H_{31}(j2\pi F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot |H_{32}(j2\pi F)|^2, \quad (2)$$

где  $S(F)$  с индексами – математические модели СПМ фазовых шумов составных блоков синтезатора [10, 11]: генератора опорной частоты, делителей частот, фазового дискриминатора, петлевого фильтра нижних частот, генератора, управляемого напряжением.  $H_{31}(j2\pi F)$  – передаточная функция кольца ФАПЧ по внешним шумам;  $H_{32}(j2\pi F)$  – передаточная функция кольца ФАПЧ по внутренним шумам.

Математические модели СПМ фазовых шумов гибридных синтезаторов состояются из представленных выше моделей, в зависимости от положения ЦВС в структуре системы ФАПЧ [14].

Алгоритмы структурного проектирования синтезаторов будут состоять из следующей последовательности действий:

Шаг 1. Выбор метода синтеза и задание исходных данных: значение частоты входного (опорного) сигнала, значение или диапазон выходных частот.

Шаг 2. Расчет частотных соотношений в структуре синтезатора. Рассчитываются все возможные параметры синтезатора (значения коэффициентов деления, умножения, передачи составных блоков) в зависимости от выбранного типа для достижения заданных исходных данных.

Шаг 3. Выбор оптимальных с точки зрения уровня фазовых шумов параметров синтезатора. На данном этапе каждая комбинация рассчитанных на предыдущем шаге значений параметров подставляется в математическую модель СПМ фазовых шумов и, далее, рассчитывается значение СПМ фазовых шумов при фиксированном одном или нескольких значениях частоты отстройки от несущей. Параметры, соответствующие наименьшему значению СПМ фазовых шумов и будут являться оптимальными.

Шаг 4. Расчет остальных параметров синтезатора (номиналов элементов петлевых ФНЧ, шага перестройки частоты и т.д.).

Шаг 5. Моделирование и анализ шумовых характеристик синтезатора. С помощью анализа можно определить составные блоки синтезатора, вносящие наибольший вклад в результирующий уровень СПМ фазовых шумов на разных значениях отстройки от несущей.

### **Программное средство для анализа шумовых характеристик**

На основе представленных алгоритмов было разработано специализированное программное средство, позволяющее провести расчет частотных соотношений в структуре синтезаторов, выбрать оптимальные параметры, провести математическое моделирование и анализ шумовых характеристик синтезаторов частот.

Интерфейс программного средства представлен на рис. 1. Цифрами на рис. 1 обозначены: 1 – инструменты выбора метода синтеза, 2 – область ввода исходных данных, 3 – инструменты выбора интегральных микросхем, на которых будет построен синтезатор, и типа петлевого ФНЧ; 4 – область вывода характеристик интегральных микросхем, 5 – область вывода структурной схемы синтезатора, 6 – область вывода результатов моделирования СПМ фазовых шумов, 7 – области вывода рассчитанных параметров для каждого из синтезаторов.

Программное средство содержит пополняемую базу данных современных интегральных микросхем. В базе данных приведены основные характеристики микросхем: диапазоны и ограничения поддерживаемых частот, а также значения коэффициентов аппроксимации степенных полиномов, образующих математические модели СПМ фазовых шумов. Методики расчета коэффициентов аппроксимации по экспериментальным данным цифровых вычислительных синтезаторов и частотно-фазовых детекторов микросхем ФАПЧ разработаны авторами данного исследования.

На рис. 1 представлены результаты моделирования СПМ фазовых шумов различных типов формирователей сигналов С-диапазона с частотой выходного сигнала  $f_{\text{вых}} = 5200$  МГц. Типы формирователей, для которых было проведено моделирование: график 1 – цифровой вычислительный синтезатор; график 2 – синтезатор на основе системы ФАПЧ; график 3 – ГСЧ с ЦВС в качестве опорного генератора; график 4 – ГСЧ с ЦВС в цепи обратной связи; график 5 – ГСЧ с ЦВС в качестве генератора подставки; график 6 – ГСЧ, использующий образы основной частоты ЦВС. Программное средство рассчитало все параметры синтезаторов; провело математическое моделирование шумовых характеристик.

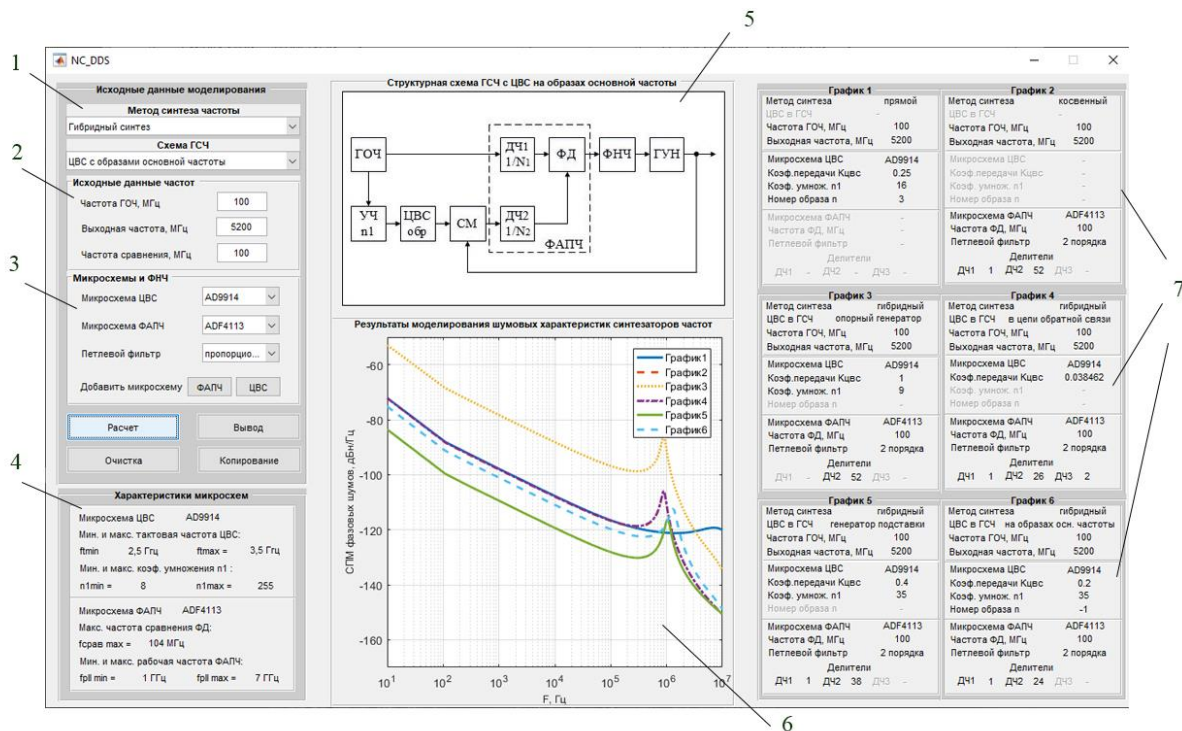


Рис. 1. Графический интерфейс программного средства с результатами моделирования шумовых характеристик для частоты выходного сигнала  $f_{\text{вых}} = 5200$  МГц

## Выводы

Представленные в данной работе алгоритмы структурного проектирования формирователей сигналов, построенных по различным методам синтеза, позволяют рассчитать основные частотные соотношения в структуре синтезаторов, выбрать те соотношения, при которых достигается наименьший уровень СПМ фазовых шумов, провести математическое моделирование и анализ шумовых характеристик.

## Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
2. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 676 с.
3. Костров В.В., Толстов Е.Ф. Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн [Электронный ресурс]:

Конспекты лекций / VII Всероссийские Армандовские чтения: молод. школа. Муром: Изд. - полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017. С. 76–113.

4. Шапиро Д.Н., Паин А.А. Основы теории синтеза частот. М.: Радио и связь, 1981. 264 с.

5. Kroupa V.F. Frequency Synthesis Theory, Design and Applications. New York: Willey, 1973. 431 p.

6. Gardner F. Phaselock techniques, 3rd Edition. Wiley, 2005. 450 p.

7. Kroupa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. John Wiley & Sons, Ltd, 1998. 396 p.

8. Chenakin A. Frequency Synthesizers: From Concept to Product. New York: Artech House, 2010. 235 p.

9. Sam, B. Hybrid Frequency Synthesizer Combines Octave Tuning Range and Millihertz Steps // Applied Microwave & Wireless. May 1999. Pp. 76–84.

10. Leeson, D.B. A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum // IEEE Proc. Letters. February 1966. Vol. 54. Pp. 329–330.

11. Рьжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.

12. Kroupa, V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. New York. John Wiley & Sons, Ltd, 2003. 320 p.

13. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K. Research of Phase Noise of Direct Digital Synthesizers // Proc. of the 2011 IEEE Int. Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2011. Krasnoyarsk, Russia. September 15-16. 2011. Pp. 168–171.

14. Romashov V.V., Yakimenko K.A. Modelling and comparing of phase noise curves of hybrid synthesizers // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015. Omsk State Technical University. Russia, Omsk. May 21–23, 2015. Pp. 714–719. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147198.