

Формирование и усиление сигналов

УДК 621.396.

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ СТРУКТУРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ ПРЯМОГО АНАЛОГОВОГО И ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО МЕТОДОВ СИНТЕЗА

Ромашов Владимир Викторович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».
E-mail: romashovmurom@mail.ru.

Якименко Кирилл Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».
E-mail: yakimenko.kirill@yandex.ru.

Докторов Андрей Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».
E-mail: doctorov_a_n@mail.ru.

Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Аннотация: Гибридные синтезаторы частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза (гибридные цифро-аналоговые синтезаторы) обеспечивают малый шаг и высокую скорость перестройки частоты, поддерживают различные виды модуляции, а также имеют низкий уровень фазовых шумов. Основным принцип построения таких синтезаторов заключается в переносе малого шага перестройки частоты синтезатора прямого цифрового метода синтеза — цифрового вычислительного синтезатора (ЦВС) на более высокий частотный диапазон путём операции смещения с сигналами, формируемыми высокостабильными генераторами частот. В данной работе представлено специальное программное средство для структурного проектирования гибридных синтезаторов частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза, моделирования и анализа шумовых характеристик, а также для определения частотных соотношений в структуре синтезатора за счёт которых достигается наименьший уровень фазовых шумов.

Ключевые слова: синтезатор частот, прямой синтез, цифровой вычислительный синтезатор, гибридный синтезатор частот, программное средство.

Введение

Формирователи сигналов, входящие в состав современных радиосистем, должны обеспечивать широкий диапазон выходных частот (до нескольких октав) и высокое разрешение по частоте (до единиц Гц). Помимо этого, к формирователям предъявляются высокие требования по уровню фазовых шумов и дискретных побочных составляющих спектра выходного сигнала.

Гибридные синтезаторы частот обладают

рядом преимуществ перед синтезаторами, построенными по традиционным методам синтеза: прямому [1, 2] и косвенному [3, 4]. Ключевая особенность гибридного метода синтеза состоит в том, что объединение традиционных методов синтеза позволяет компенсировать недостатки одних систем достоинствами других [5–7].

В настоящее время активно используются гибридные синтезаторы на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов

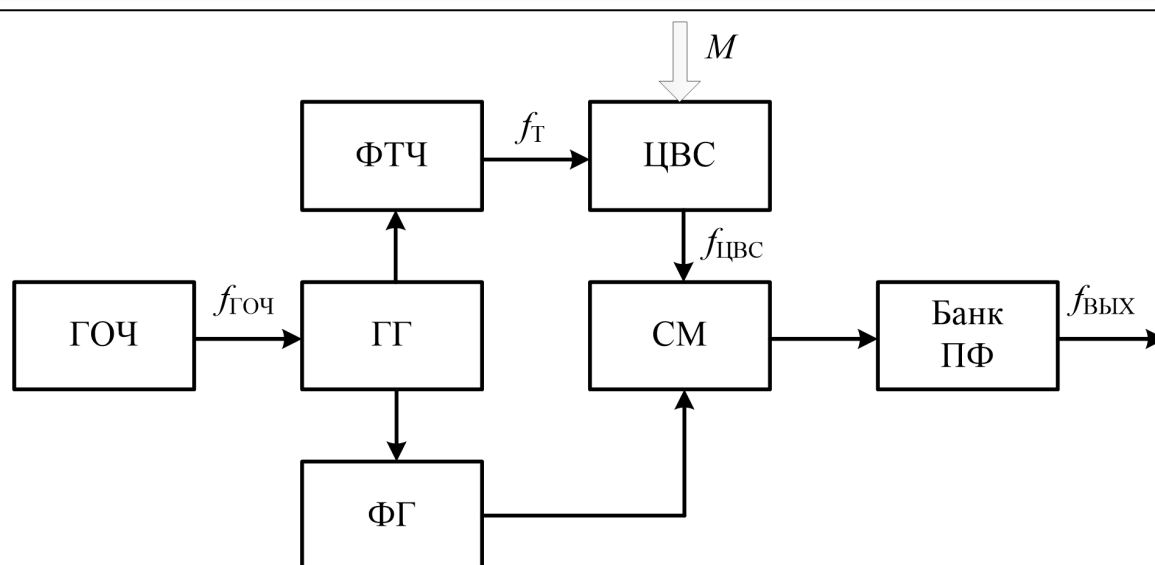


Рис. 1. Структурная схема синтезатора частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза

синтеза. Такие синтезаторы способны формировать гармонический сигнал в широком диапазоне частот, обеспечивают высокое частотное разрешение, обладают низким уровнем фазовых шумов.

Уровень фазовых шумов в синтезаторах оценивается спектральной плотностью мощности (СПМ) фазовых шумов в зависимости от частоты отстройки от несущей F . Для анализа шумовых характеристик используют математические модели СПМ фазовых шумов [8–10]. Поскольку многие типы синтезаторов частот состоят из нескольких составных блоков, которые функционируют на разных частотах (как, например, в синтезаторах на основе системы ФАПЧ), то сигнал с заданной частотой можно получить при различных частотных соотношениях в структуре синтезатора. В связи с этим актуальной представляется задача выбора оптимальных частотных соотношений, при которых синтезатор будет обеспечивать наименьший уровень фазовых шумов. Авторами разработаны специальные алгоритмы структурного проектирования гибридных синтезаторов частот, а также выбора оптимальных частотных соотношений [11, 12]. Алгоритмизация обычно требует автоматизации вычислений, поэтому целью данной работы является

разработка специализированного программного средства, позволяющего провести структурное проектирование гибридного синтезатора частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза, рассчитать оптимальные с точки зрения уровня фазовых шумов параметры синтезатора.

Гибридный синтезатор частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза

Структурная схема гибридного синтезатора частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза представлена на рис. 1. В основе функционирования таких синтезаторов, как правило, лежит принцип переноса малого шага перестройки частоты, формируемого синтезатором прямого цифрового метода синтеза — цифровым вычислительным синтезатором (ЦВС), на высокий частотный диапазон за счёт операции смешения с сигналом, формируемым одним или несколькими высокочастотными генераторами. При этом сохраняются такие преимущества прямых аналоговых синтезаторов, как высокая скорость перестройки по частоте и низкий уровень фазовых шумов. В то же время устраняется такой недостаток прямых аналоговых син-

тезаторов, как достижение малого шага лишь за счёт существенного усложнения архитектуры.

Генератор опорной частоты (ГОЧ) формирует высокостабильный сигнал с частотой $f_{\text{ГОЧ}}$, который подаётся на генератор гармоник (ГГ). В качестве генератора гармоник может быть использован диод с накоплением заряда. На выходах генератора гармоник присутствует ряд гармонических составляющих, кратных частоте $f_{\text{ГОЧ}}$. Фильтр тактовой частоты (ФТЧ) и фильтр опорной гармоники (ФГ) выделяют тактовый сигнал для ЦВС с частотой f_{T} и опорную гармонику для смешения, соответственно. ЦВС, управляемый кодовым словом M и тактируемый сигналом с частотой f_{T} , вырабатывает сигнал с частотой $f_{\text{ЦВС}}$, который затем смешивается в смесителе (СМ) с опорной гармоникой. Банк полосовых фильтров выделяет частоту выходного сигнала $f_{\text{ВЫХ}}$.

Частота выходного сигнала гибридного синтезатора определяется по формуле

$$f_{\text{ВЫХ}} = f_{\text{ЦВС}} + n_{\text{Г}} \cdot f_{\text{ГОЧ}} = +f_{\text{ГОЧ}}(n_{\text{T}} \cdot K_{\text{ЦВС}} + n_{\text{Г}}), \quad (1)$$

где n_{T} — номер гармоники для получения тактовой частоты ЦВС; $n_{\text{Г}}$ — номер опорной гармоники; $K_{\text{ЦВС}}$ — коэффициент передачи ЦВС.

Шаг перестройки частоты гибридного синтезатора равен шагу перестройки частоты ЦВС и определяется по формуле

$$\Delta f_{\text{ЦВС}} = f_{\text{T}} / 2^{N_{\text{НКФ}}} = n_{\text{T}} f_{\text{ГОЧ}} / 2^{N_{\text{НКФ}}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{НКФ}}$ — разрядность накопителя кода фазы ЦВС.

Математическая модель СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора имеет вид [10]:

$$S_{\text{ГС}}(F) = S_{\text{ГОЧ}}(F)n_{\text{T}}^2 K_{\text{ЦВС}}^2 + S_{\text{ЦВС}}(F) + +S_{\text{ГОЧ}}(F)n_{\text{Г}}^2 + S_{\text{СМ}}(F) + S_{\text{ПФ}}(F), \quad (3)$$

где $S_{\text{ГОЧ}}(F)$ — математическая модель СПМ фазовых шумов генератора опорной частоты; $S_{\text{ЦВС}}(F)$ — математическая модель СПМ фа-

зовых шумов цифрового вычислительного синтезатора; $S_{\text{СМ}}(F)$ — математическая модель СПМ фазовых шумов смесителя; $S_{\text{ПФ}}(F)$ — математическая модель СПМ фазовых шумов полосового фильтра.

Алгоритм работы программного средства

Исходными данными для расчётов являются значения частоты опорного сигнала и частоты выходного сигнала. Расчёт основных частотных соотношений в структуре синтезатора проводится по алгоритмам, представленным в [11, 12]. В итоге работа программного средства состоит из следующих этапов.

На первом этапе определяются все возможные комбинации трёх параметров гибридного синтезатора (коэффициент передачи ЦВС $K_{\text{ЦВС}}$, номер гармоники для получения тактовой частоты n_{T} , номер гармоники для получения опорной частоты $n_{\text{Г}}$), при установке которых синтезатор сформирует заданную выходную частоту.

На втором этапе определяются оптимальные частотные соотношения в структуре синтезатора, т.е. из набора комбинаций параметров выбирается та комбинация, при которой гибридный синтезатор имеет наименьший уровень фазовых шумов. Это организовано следующим образом. В математическую модель (3) СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора поочерёдно подставляются наборы параметров ($K_{\text{ЦВС}}$, n_{T} , $n_{\text{Г}}$). Для фиксированной частоты отстройки рассчитываются значения СПМ фазовых шумов, которые записываются в массив. Затем массив сортируется по убыванию, и в итоге комбинация параметров, для которой определяется минимальное значение СПМ, и есть та оптимальная комбинация параметров.

На третьем этапе по математической модели (3) проводится моделирование СПМ фазовых шумов в зависимости от несущей. Рассчитываются вклады составных блоков гибридного синтезатора в результирующий уровень СПМ фазовых шумов.

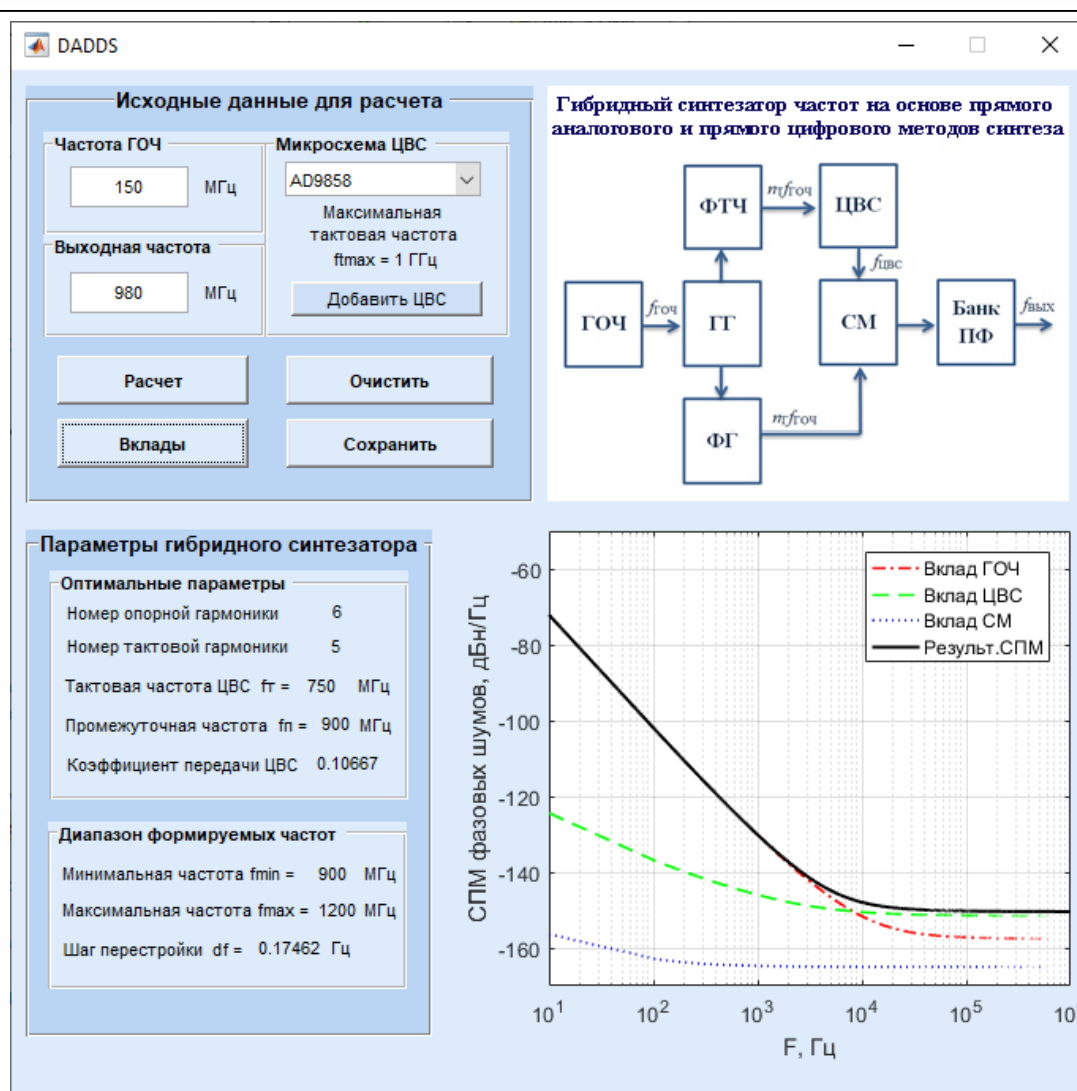


Рис. 2. Графический интерфейс программного средства

На четвёртом этапе рассчитывается шаг перестройки, а также минимальная и максимальная частоты гибридного синтезатора.

Графический интерфейс программного средства

Программное средство было разработано в среде Matlab Guide. Графический интерфейс представлен на рис. 2.

В области ввода исходных данных вводятся значения частоты опорного генератора и частоты выходного сигнала. Далее необходимо выбрать микросхему ЦВС. На выбор пользователю предлагается несколько микросхем, производимых фирмой Analog Devices. При выбо-

ре одной из микросхем из базы данных программного средства загружается математическая модель СПМ фазовых шумов данной микросхемы, а также значение максимально допустимой тактовой частоты f_{Tmax} ; разрядность накопителя кода фазы $N_{НКФ}$.

При нажатии кнопки «Расчёт» программное средство по алгоритму, представленному выше, проведёт выбор оптимальных, с точки зрения уровня фазовых шумов, частотных соотношений в структуре синтезатора. Далее проводится моделирование СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора. В координатных осях строится зависимость спектральной плотности мощности фазовых шумов в двойном логарифме

Таблица 1. Параметры гибридного синтезатора для формирования сигнала с частотой $f_{\text{ВЫХ}} = 980$ МГц при реализации на микросхеме AD9858

| № | Номер гармоники для получения тактовой частоты, n_T | Номер гармоники для получения опорной частоты, n_G | Коэффициент передачи ЦВС, $K_{\text{ЦВС}}$ | Уровень СПМ фазовых шумов на частоте отстройки $F = 10$ кГц |
|----------|---|--|--|---|
| 1 | 5 | 5 | 0,3067 | -142,19 |
| 2 | 2 | 6 | 0,2667 | -143,07 |
| 3 | 3 | 6 | 0,1777 | -145,64 |
| 4 | 5 | 6 | 0,1067 | -147,95 |

Таблица 2. Параметры гибридного синтезатора для формирования сигнала с частотой $f_{\text{ВЫХ}} = 980$ МГц при реализации на микросхеме AD9915

| № | Номер гармоники для получения тактовой частоты, n_T | Номер гармоники для получения опорной частоты, n_G | коэффициент передачи ЦВС, $K_{\text{ЦВС}}$ | Уровень СПМ фазовых шумов на частоте отстройки $F = 10$ кГц |
|-----------|---|--|--|---|
| 1 | 15 | 1 | 0,3689 | -138,64 |
| 2 | 7 | 4 | 0,3619 | -138,86 |
| 3 | 5 | 5 | 0,3066 | -140,19 |
| 4 | 7 | 5 | 0,2190 | -142,85 |
| 5 | 14 | 5 | 0,1095 | -147,55 |
| 6 | 15 | 5 | 0,1022 | -147,93 |
| 7 | 2 | 6 | 0,2667 | -141,21 |
| 8 | 3 | 6 | 0,1778 | -144,20 |
| 9 | 5 | 6 | 0,1067 | -147,29 |
| 10 | 7 | 6 | 0,0762 | -148,74 |
| 11 | 10 | 6 | 0,0533 | -149,77 |
| 12 | 11 | 6 | 0,0485 | -149,97 |

рифмическом масштабе на частотах отстройки от 10 Гц до 1 МГц от несущей.

При нажатии кнопки «Вклады» программное средство проводит моделирование вкладов составных блоков гибридного синтезатора в результирующий уровень СПМ фазовых шумов. Кнопка «Сохранить» позволяет вывести график на дополнительное окно, и затем с помощью меню этого окна можно сохранить график в любом графическом формате и любом масштабе. Кнопка «Очистить» позволяет очистить координатные оси.

Все рассчитанные параметры гибридного синтезатора выводятся на панелях «Оптимальные параметры» и «Диапазон формируемых частот».

Рассмотрим пример структурного проектирования и анализа шумовых характеристик для опорной частоты $f_{\text{ГОЧ}} = 150$ МГц и выходной частоты $f_{\text{ВЫХ}} = 980$ МГц при построении гибридного синтезатора на микросхемах AD9858 и AD9915 с помощью предлагаемого про-

граммного средства.

В таблице 1 и таблице 2 представлены комбинации параметров, при которых гибридный синтезатор формирует заданные частоты, а также соответствующие им уровни СПМ фазовых шумов. Полужирным шрифтом в таблицах выделены комбинации, при которых достигается наименьший уровень СПМ фазовых шумов.

На рис. 3 приведены: а) оптимальные параметры гибридного синтезатора; б) результаты моделирования вкладов составных блоков гибридного синтезатора в результирующий уровень СПМ фазовых шумов при использовании в качестве ЦВС микросхемы AD9858.

На рис. 4 приведены: а) оптимальные параметры гибридного синтезатора; б) результаты моделирования вкладов составных блоков гибридного синтезатора в результирующий уровень СПМ фазовых шумов при использовании в качестве ЦВС микросхемы AD9915.

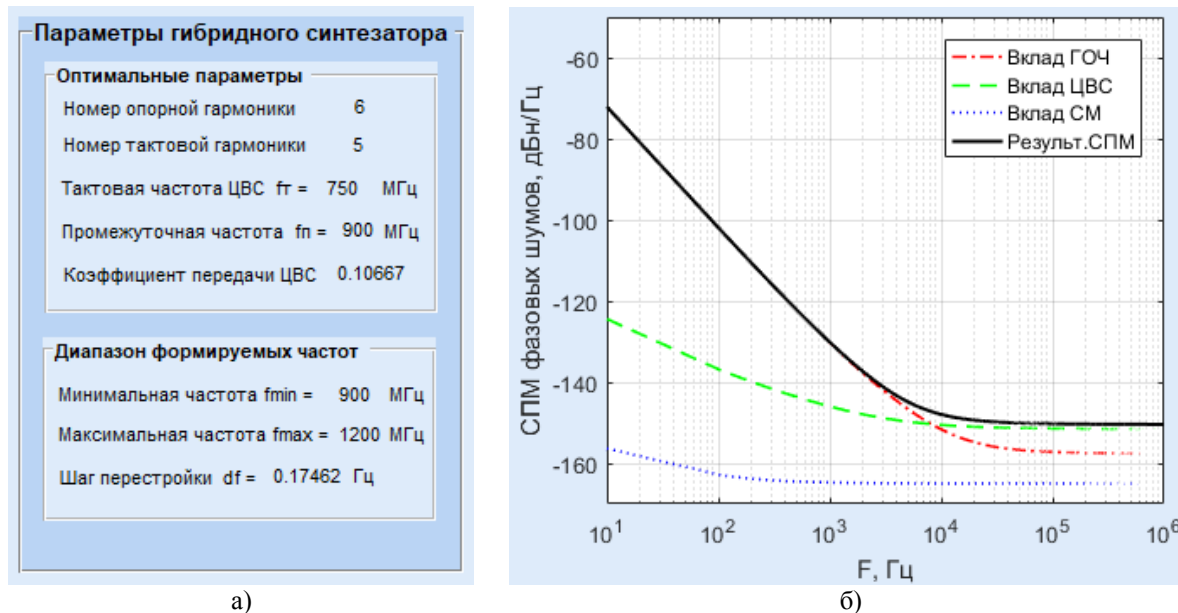


Рис. 3. Результаты расчёта и моделирования шумовых характеристик гибридного синтезатора для микросхемы AD9858 при $f_{вых} = 980$ МГц

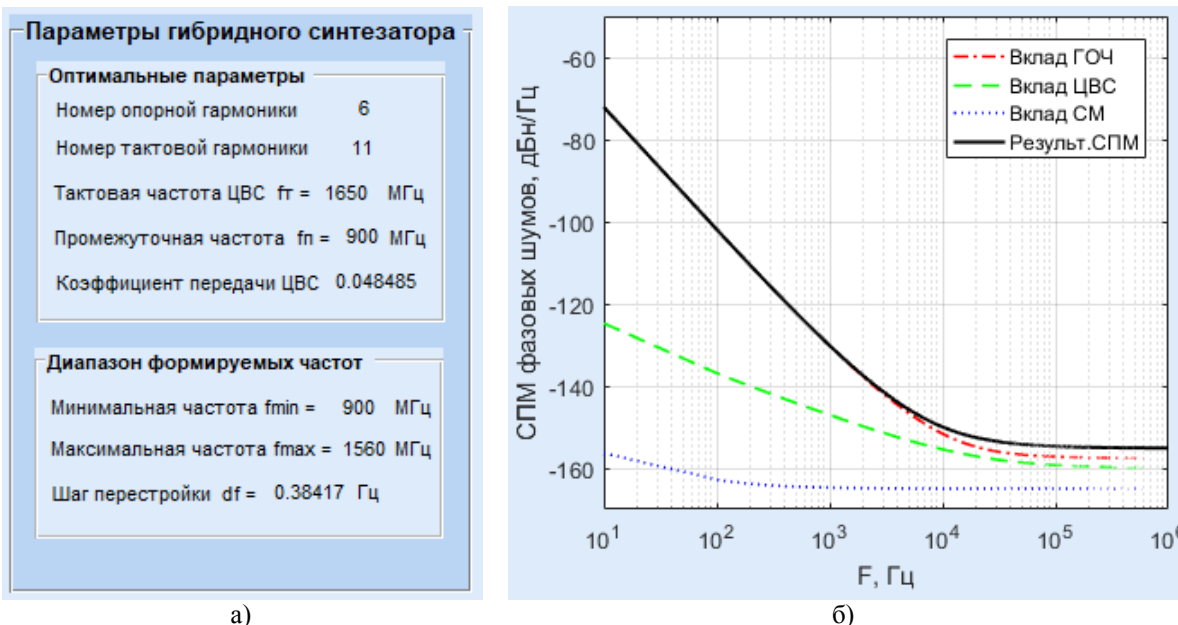
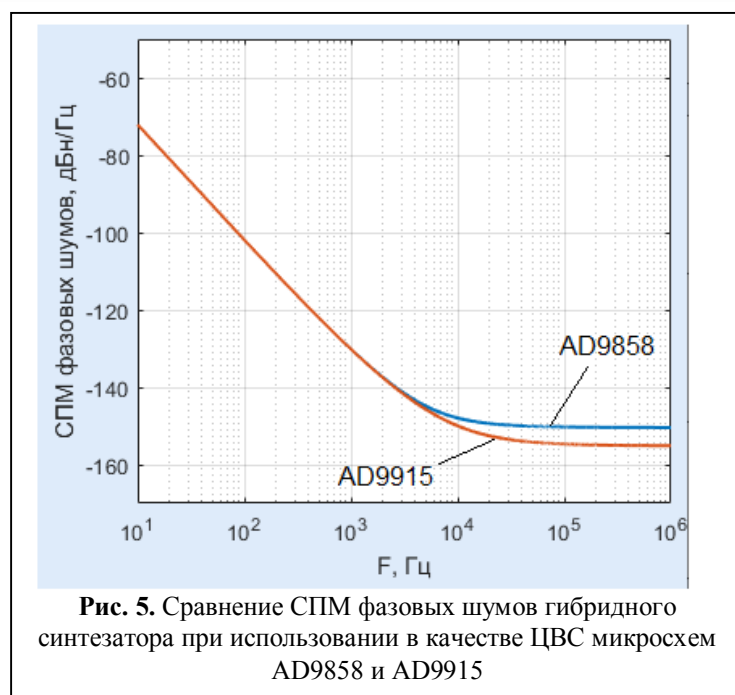


Рис. 4. Результаты расчёта и моделирования шумовых характеристик гибридного синтезатора для микросхемы AD9915 при $f_{вых} = 980$ МГц

В соответствии с результатами расчёта и моделирования можно сделать вывод, что при реализации гибридного синтезатора на микросхеме AD9858 на отстройке свыше 10 кГц ЦВС вносит вклад, превышающий вклад ГОЧ и остальных блоков. Кроме того, за счёт более

высокой допустимой тактовой частоты (2,5 ГГц против 1 ГГц) использование микросхемы AD9915 в качестве ЦВС позволяет гибриднему синтезатору формировать более широкий диапазон частот.



На рис. 5 приведены результаты моделирования в программном средстве и сравнения СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора при использовании микросхем AD9858 и AD9910.

По результатам моделирования видно, что при использовании микросхемы AD9915 гибридный синтезатор имеет выигрыш по уровню фазовых шумов на 7–8 дБ на частотах отстройки свыше 10 кГц.

Заключение

В данной работе представлено описание разработанного авторами специализированного программного средства для структурного проектирования гибридного синтезатора частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза. Программное средство позволяет провести моделирование и анализ шумовых характеристик синтезатора, определить частотные соотношения в структуре синтезатора, при которых достигается наименьший уровень фазовых шумов.

Описанные в работе алгоритмы, в которых используются математические модели СПМ фазовых шумов блоков синтезатора, могут быть использованы разработчиками малошумящих формирователей радиосигналов при проектировании современных радиосистем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации, а также Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках проекта по конкурсу УМНИК-2018.

Литература

1. Белов Л.А. Формирование стабильных частот и сигналов: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Академия, 2005. 224 с.
2. Kroupa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. John Wiley & Sons, Ltd, 1998. 396 p.
3. Левин В.А., Малиновский В.П., Романов С.К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. М.: Радио и связь, 1989. 232 с.
4. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. New York. John Wiley & Sons, Ltd, 2003. 320 p.
5. Бельчиков С. Фазовый шум: как спуститься ниже –120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц в диапазоне частот до 14 ГГц, или борьба за децибелы // Компоненты и технологии. 2009. № 5, № 6.
6. Miles J., Hosking R. A Versatile Hybrid Synthesizer // Communications Quarterly. March/April 2004. Pp. 1–47.
7. Yongke L. The Design of Wide BW Frequency Synthesizer Based on the DDS&PLL Hybrid Method // The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments, ICEMI. Aug. 16–19, 2009. Pp. 689–692.
8. Leeson D.B. A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum // IEEE Proc. Letters. February 1966. Vol. 54. Pp. 329–330.
9. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
10. Ромашов В.В., Якименко К.А., Докторов А.Н., Ромашова Л.В. Малошумящие гибридные синтезаторы частот на основе прямых методов синтеза - цифрового и аналогового // Измерительная техника. 2020. № 4. С. 51–56.
11. Якименко К.А. Алгоритм построения гибридных синтезаторов частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза // Электронные средства и системы управления.

Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2019. Т. 1. № 1-1. С. 35–37.

12. Romashov V.V., Yakimenko K.A., Romashova L.V., Doktorov A.N. Algorithm for designing low-noise frequency synthesizers for remote sensing systems // Journal of Physics: Conference Series. Volume 1632. Russian open scientific conference «Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction» (MPSRWPD) 2020 23–25 June 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1632/1/012017.

Поступила 23 июня 2020 г.

English

SOFTWARE FOR DESIGN OF HYBRID FREQUENCY SYNTHESIZER BASED ON DIRECT ANALOG AND DIRECT DIGITAL SYNTHESIS

Vladimir Viktorovich Romashov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Radio Engineering Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: romashovmurom@mail.ru.

Kirill Aleksandrovich Yakimenko — Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: yakimenko.kirill@yandex.ru.

Andrey Nikolayevich Doktorov — Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: doktorov_a_n@mail.ru.

Address: 602264, Russian Federation, Vladimir Region, Murom, Orlovskaya street. 23.

Abstract: Hybrid frequency synthesizers based on direct analog and direct digital synthesis methods (hybrid digital-analog synthesizers) provide a small step and high frequency tuning speed, support various types of modulation, and have a low level of phase noise. The basic principle of constructing such synthesizers is transferring a small step of frequency tuning of the synthesizer of a direct digital synthesis method — a digital synthesizer (DDS) to a higher frequency range by mixing with signals generated by reference frequency generators. This paper describes the principle of operation of a hybrid synthesizer. A block diagram and mathematical model of the power spectral density (PSD) of phase noise are presented. Algorithms for structural design and determination of optimal parameters are proposed. A special software tool for structural design of hybrid frequency synthesizers based on direct analog and direct digital methods of synthesis is presented. Software automatically calculated optimal frequency ratios in the synthesizer structure provided the lowest level of phase noise. An example of structural design and analysis of the noise characteristics of a hybrid synthesizer based on DDS chips: AD9858 and AD9915. The optimal frequency ratios in the synthesizer structure are determined. The contributions of synthesizer components to the resulting level of phase noise are analyzed. The hybrid synthesizer has a gain in the level of phase noise by 7-8 dB at tuning frequencies above 10 kHz when it based on AD9915 chip.

Keywords: frequency synthesizer, direct synthesis, direct digital synthesizer, hybrid frequency synthesizer, software.

The reported study was funded by the Council on grants of the President of the Russian Federation and the Fund for assistance to the development of industrial enterprises in the scientific and technical sphere in the framework of the project for the contest UMNİK-2018.

References

1. Belov L.A. Formation of stable frequencies and signals: Textbook for students. Moscow: Akademiya, 2005, 224 p.
2. Kroupa V.F. Direct digital frequency synthesizers. John Wiley & Sons, Ltd, 1998. 396 p.

3. Levin V.A., Malinovsky V.P., Romanov S.K. Frequency synthesizers with a pulse-phase auto-tuning system. Moscow: Radio i Svyaz, 1989. 232 p.
4. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. New York. John Wiley & Sons, Ltd, 2003. 320 p.
5. Belchikov S. Phase noise: how to go down below -120 dBc/Hz at 10 kHz tuning in the frequency range up to 14 GHz, or fight for decibels. Components and technologies. 2009. No. 5, No. 6.
6. Miles J., Hosking R. A Versatile Hybrid Synthesizer. Communications Quarterly. March/April 2004. Pp. 1–47.
7. Yongke L. The Design of Wide BW Frequency Synthesizer Based on the DDS&PLL Hybrid Method. The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments, ICEMI. Aug. 16–19, 2009. Pp. 689–692.
8. Leeson D.B. A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum. IEEE Proc. Letters. February 1966. Vol. 54. Pp. 329–330.
9. Ryzhkov A.V., Popov V.N. Synthesizers of frequencies in radio communication technology. Moscow: Radio i Svyaz, 1991. 264 p.
10. Romashov V.V., Yakimenko K.A., Doktorov A.N., Romashova L.V. Low-noise hybrid frequency synthesizers based on direct synthesis methods – digital and analog. Measurement techniques. 2020. No. 4. Pp. 51–56.
11. Yakimenko K.A. Algorithm for constructing hybrid frequency synthesizers based on direct analog and direct digital synthesis methods. Electronic tools and control systems. Reports of the International scientific and practical conference. 2019. Vol. 1. No. 1-1. Pp. 35–37.
12. Romashov V.V., Yakimenko K.A., Romashova L.V., Doktorov A.N. Algorithm for designing low-noise frequency synthesizers for remote sensing systems. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1632. Russian open scientific conference «Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction» (MPRS-RWPD) 2020 23–25 June 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1632/1/012017.