

Эффективное упрощение прецизионного синтезатора частоты

В.А. Жмудь¹, Л.В. Димитров², А.Ю. Ивойлов¹

¹ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия.
630090, просп. К. Маркса, д. 20.

²Технический университет Софии, София, Болгария. бул. „св. Климент Охридски“ 8, 1756

Аннотация: Синтезаторами частоты называют генераторы, частота которых управляется кодом. Подобные устройства изготавливаются различными фирмами, но остается актуальной разработка и синтезаторов с особыми свойствами, которыми не обладают серийные изделия. К таким свойствам относится сверхвысокая точность формирования частоты в зависимости только от кода, который задает требуемое ее значение и от частоты опорного генератора, которым, как правило, является водородный или иной стандарт частоты. Наиболее актуальны такие синтезаторы в задачах абсолютных частотных измерениях. Известные технических решения не отвечают специфическим требованиям. Необходимо отсутствие скачков сигнала при переключениях управляющего кода и плавность изменения фазы формируемого сигнала. Поэтому необходима разработка синтезаторов, обладающих этими свойствами. Точность таких синтезаторов повышается за счет добавления идентичных блоков. Однако эти блоки все же сложны, поэтому их добавление порождает сильное удорожание синтезатора. Данная статья предлагает новое решение указанной задачи путем разработки простых блоков уточнения. Упрощение достигается за счет отсутствия подсистем фазовой автоподстройки. Синтезатор содержит простейший блок формирования только двух опорных частот, несколько одинаковых блоков, содержащих синхронизованные коммутаторы, сумматоры частот, делители частоты и фильтры, причем технические требования ко всем этим узлам предельно просты. Высокие характеристики устройства в целом достигаются за счет организации алгоритма преобразования сигналов в нем. Выбранные соотношения частот предельно упрощают фильтры. Приведено теоретическое обоснование работоспособности всех технических решений, подтвержденное моделированием, также дана функциональная схема синтезатора.

Ключевые слова: синтезатор частоты, прецизионный генератор, частотная автоподстройка, фазовая автоподстройка, лазерные системы, управление частотой, управление фазой

ВВЕДЕНИЕ

В задачах прецизионных измерений, в фундаментальной метрологии и в других задачах лазерной физики требуется чрезвычайно точная генерация сигнала заданной частоты, а также очень точная и плавная перестройка этой частоты с очень малым шагом [1–5]. Ранее эти задачи решались созданием высокостабильного управляемого генератора, но это не отвечало требованиям по стабильности частоты, хотя и обеспечивало достаточную плавность ее изменения. Современные устройства лазерной физики предъявляют к таким генераторам столь высокие требования, что они могут быть удовлетворены лишь путем цифрового синтеза частоты, что выполняется в частотных синтезаторах [6–13]. Это совершенно иной класс устройств, в которых частота генерации определяется не входным управляющим напряжением, а точно задается входным кодом. Изменение кода на единицу младшего разряда должно вызывать изменение частоты на минимальный шаг, причем это изменение должно происходить без резких скачков фазы. Это одно из наиболее существенных и труднодостижимых требований.

В НГТУ и Институте лазерной физики СО РАН разработан ряд устройств, в которых применяются подобные синтезаторы, и прогресс таких устройств в существенной мере зависит от прогресса в области создания синтезаторов частоты. Одна из последних версий такого синтезатора описана в статье [14]. Указанное устройство все же обладает некоторыми недостатками, для преодоления которых выполнены исследования, результаты которого описаны в данной статье. Эти исследования направлены на создание синтезатора частот, характеризующегося более плавными переходными процессами при переключении частоты, а также большей надежностью, простотой и лучшими возможностями для уменьшения шага управления, т.е. повышения точности.

1. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ПРОТОТИПА

Прототип синтезатора выполнен по комбинационному принципу с диапазонно-кварцевой стабилизации частоты. Его функциональная схема показана на *Рис. 1*.

Устройство содержит образцовый кварцевый генератор частоты $F_0 = 10 \text{ МГц}$, несколько

счетчиков для получения кратных частот: $F_1 = 1 \text{ MHz}$, $F_2 = 6,25 \text{ kHz}$ и $F_3 = 125 \text{ kHz}$, интерфейс для ввода управляющего кода и ряд однотипных узлов суммирования и деления частот. При этом каждый такой узел содержит систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), частотный сумматор и счетчик-делитель. Каждый узел осуществляет преобразование входной частоты в частоту с приращением, определяемым управляющим кодом. С этой целью ФАПЧ вырабатывает частоту по соотношению

$$F_{out} = F_{in} \times (140 + \Delta_i).$$

Здесь входная частота близка к значению $F_2 = 6,25 \text{ kHz}$. После умножения на 140

выходная частота близка к значению $F = 875 \text{ kHz}$. На выходе первого узла далее выходная частота складывается с частотой $F_3 = 125 \text{ kHz}$, в результате получается частота, близкая к значению $F_1 = 1 \text{ MHz}$, эта частота делится на 8. В результате получается частота, которая снова близка к исходному значению $F_3 = 125 \text{ kHz}$, но уже содержит полученную добавку по частоте, разделенную на 8. Добавка частоты исходно кратна значению $F_2 = 6,25 \text{ kHz}$, поскольку именно к этому значению подстраивается частота управляемого генератора, разделенная на соответствующий код, подаваемый в данный узел.

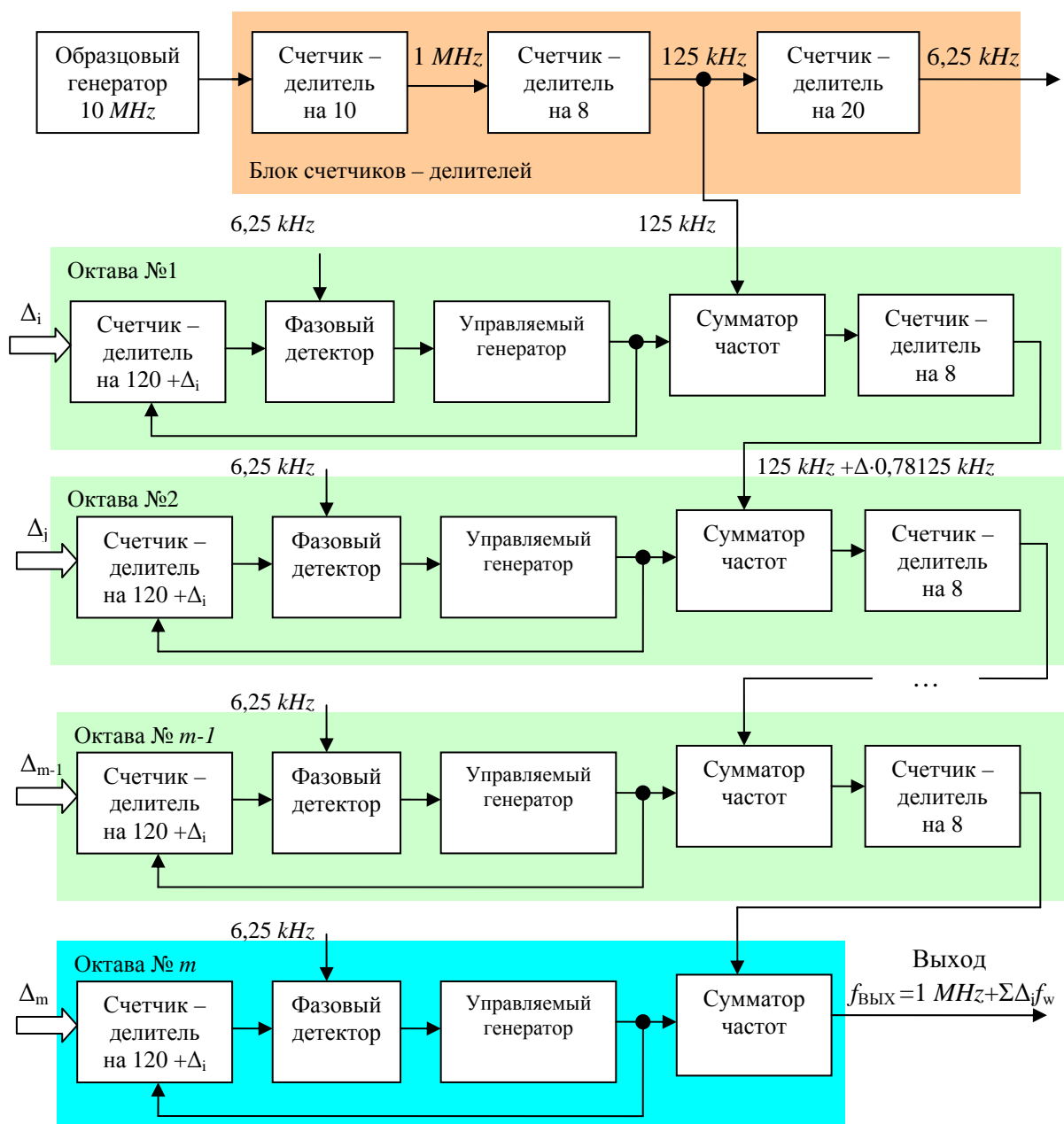


Рис. 1. Функциональная схема синтезатора

Таким образом, после первого преобразования из частоты $F_1 = 1 \text{ MHz}$ формируется

частота $F_{01} = 1 \text{ MHz} + x$, где x принимает одно из следующих значений:

$$\begin{aligned}x_0 &= 0 \text{ кГц}, \\x_1 &= F_2 = 6,25 \text{ кГц}, \\x_2 &= 2F_2 = 12,5 \text{ кГц}, \\x_3 &= 3F_2 = 18,75 \text{ кГц}, \\x_4 &= 4F_2 = 25 \text{ кГц}, \\x_5 &= 5F_2 = 31,25 \text{ кГц}, \\x_6 &= 6F_2 = 37,5 \text{ кГц}, \\x_7 &= 7F_2 = 43,75 \text{ кГц}.\end{aligned}$$

После деления на 8 получается частота в 8 раз меньше, следовательно, и приращения частоты становятся в 8 раз меньше. Эта частота добавляется во втором преобразовании, где добавляется новое приращение, и так далее.

Сумматор частот представляет собой последовательное соединение перемножителя сигналов и фильтра верхних частот. Фильтр пропускает на свой выход суммарную частоту и не пропускает разностную частоту.

Таким образом, в результате суммирования частот формируется частота $F_1 + x_i$ на первом узле, который можно назвать октавой. На выходе второй октавы формируется частота, равная $F_1 + y_j + 0,1 x_i$. На выходе третьей октавы формируется частота, равная $F_1 + z_k + 0,01 y_j + 0,001 x_i$, и т. д. Таким образом, каждая октава сдвигает полученное ранее приращение частоты в 8 раз вниз и добавляет новое приращение, сохраняя при этом значение несущей частоты $F_1 = 1 \text{ МГц}$. Это позволяет уменьшать величину шага установки частоты за счет добавления стандартных узлов. Все блоки октавы идентичны, что облегчает изготовление и отладку синтезатора.

Последний узел не содержит счетчика-делителя, поскольку в применениях к лазерным системам указанная несущая частота является той частотой, которая требуется.

Недостатком устройства является необходимость использования большого количества систем ФАПЧ. Эти ФАПЧ используются для формирования частоты, которая равна сумме выбранной несущей частоты и добавочной частоты, умноженной на дискретное значение добавки на текущем шаге, выбираемом из набора от 0 до 7.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ НОВОГО ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

Если вместо октавы использовать кварту, то добавка будет умножаться на значение от 0 до 3, при этом деление на счетчике-делителе следует осуществлять не в 8 раз, а только в 4 раза.

Такая модификация увеличила бы число идентичных блоков, но при этом существенно их упростила. Соответственно, если в рассмотренной схеме для получения частоты $F_1 = 1 \text{ МГц}$ требуется сложить две частоты, представляющие собой, соответственно, семь восьмых и одну восьмую от требуемого значения (а после деления на 8 вновь получается одна восьмая), то при модификации требовалось бы складывать частоты, равные,

соответственно, трем четвертым и одной четвертой от требуемого значения частоты.

Можно развить это направление далее, и остановиться на двукратном увеличении частоты при сложении с последующим делением частоты лишь вдвое. В этом случае добавка на каждом шаге будет изменяться лишь от 0 до 1, т.е. требуется лишь выбор одной из двух фиксированных частот.

В предыдущем варианте синтезатора, показанном на Рис. 1, для формирования частоты с добавкой используется система ФАПЧ и счетчик-делитель. Безусловно, такой узел обладает большими возможностями, но он и более сложен. Если же требуется лишь выбор одной из двух частот, то вместо системы ФАПЧ можно использовать обычный переключатель частот. Произвольное переключение частоты, как правило, порождает скачок фазы в момент переключения, но при выбранных соотношениях используемых частот этот скачок может быть устранен. Действительно, например, если требуется переключить частоты, соотносящиеся между собой как 3:4, то можно отметить, что время от времени их фазы могут совпадать, например, при определенной исходной синхронизации через каждые три периода меньшей частоты они вновь будут находиться в одной и той же фазе, так как этот интервал будет в точности равен четырем периодам большей частоты.

На Рис. 2 показаны графики двух частот, $F_{11} = 3f_0$ и $F_{12} = 4f_0$. Видно, что эти графики регулярно проходят через состояния одинаковых фаз. В данном случае эти точки соответствуют значению сигнала, равному нулю и близкому (хотя и не равному) значению производных этого сигнала. Если эти колебания не столь хорошо изначально синхронизованы, все же с периодичностью, равной четырем периодам частоты $F_{11} = 3f_0$ или, что тождественно, трем периодам частоты $F_{12} = 4f_0$, повторяется такая ситуация, что значения этих сигналов совпадают, а производная сигнала с частотой F_{11} равна трем четвертым от производной сигнала с частотой F_{12} . Эти моменты можно выявить, анализируя эти сигналы. Схема управления переключениями может быть организована так, что переключения происходят только в эти моменты времени.

На Рис. 3 показан результат работы такой схемы переключения. На первой половине этого графика сигнал имеет частоту $F_{12} = 4f_0$, а на второй половине этого графика он имеет частоту $F_{11} = 3f_0$. Переключение происходит достаточно плавно, без скачков.

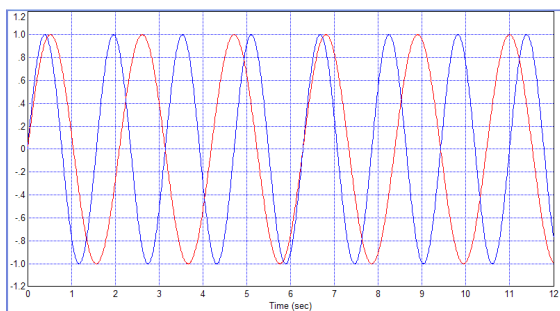


Рис. 2. Иллюстрация того факта, что частоты $3f_0$ и $4f_0$ регулярно проходят через состояние с одинаковой фазой

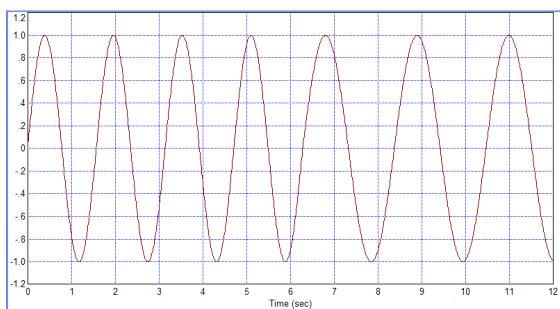


Рис. 3. Результат переключения сигналов в момент совпадения их фаз: скачок отсутствует

На Рис. 4 показан результат умножения этого сигнала на сигнал с частотой $F_{12} = 4f_0$, далее, на Рис. 5 показан такой же сигнал на большем интервале времени. Результат высокочастотной фильтрации этого сигнала показан на Рис. 6. Видно, что получаемый сигнал достаточно похож на гармонический сигнал, хотя его частота в момент переключения ($t = 12\text{ s}$) скачком изменяется.

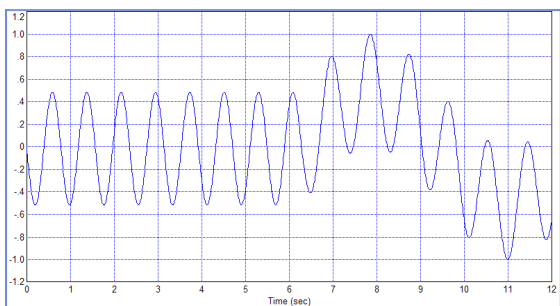


Рис. 4. Результат преобразования сигнала, показанного на Рис. 4, путем умножения его на сигнал, частота которого равна $4f_0$

На Рис. 7 и 8 показаны аналогичные сигналы при суммировании сигнала, ранее показанного на Рис. 4, с сигналом с частотой $F_{11} = 3f_0$. Видно, что и в этом случае фильтрация осуществляется достаточно эффективно, проблем со скачками сигнала не возникает, хотя частота скачком изменяется в тот же момент времени. Таким образом, совокупность этих графиков показывает, что можно скачком переключать

частоту сигнала без появления скачков в форме этого сигнала, также можно достаточно эффективно преобразовывать полученный сигнал, а именно, складывать его с другим сигналом близкой частоты методом умножения с последующей высокочастотной фильтрацией.

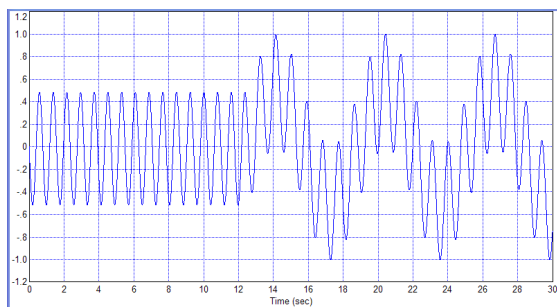


Рис. 5. Тот же сигнал, что на Рис. 4, за более продолжительный интервал времени

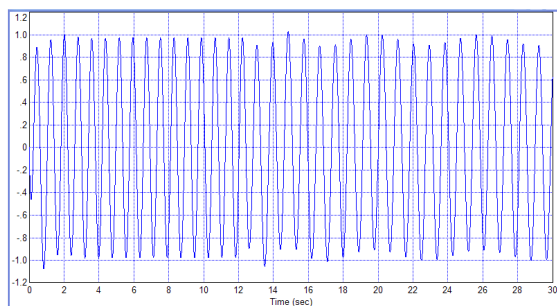


Рис. 6. Результат фильтрации сигнала, показанного на Рис. 5.

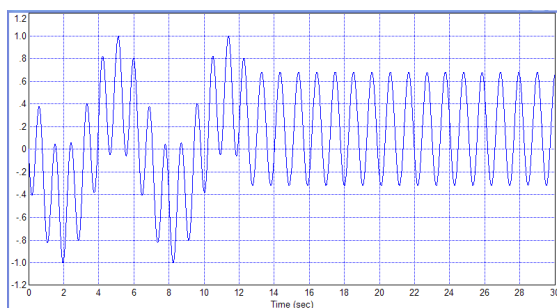


Рис. 7. Результат преобразования сигнала, показанного на Рис. 4, путем умножения его на сигнал, частота которого равна $3f_0$

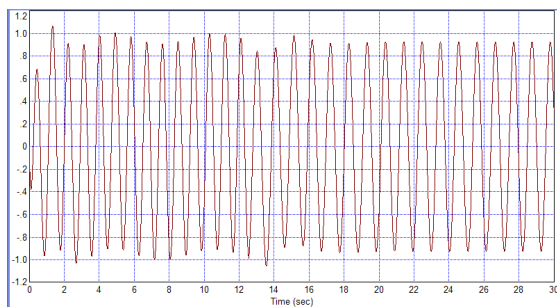


Рис. 8. Результат фильтрации сигнала, показанного на Рис. 7.

3. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ПРЕДЛАГАЕМОГО СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ

На Рис. 9 показана функциональная схема предлагаемого синтезатора частот. Прибор содержит формирователь двух частот с кратностью 2:3. В данном случае формируются частоты 500 кГц и 750 кГц. Также прибор содержит требуемое количество блоков уточнения частот. Каждый такой блок содержит коммутатор, сумматор частот и счетчик-делитель на два и фильтр. При этом сумматор частот состоит из перемножителя частот, высокочастотного фильтра и оконечного каскада, обеспечивающий преобразование

сигнала в цифровой. Фильтр выходе каждого счетчика-делителя служит для преобразования прямоугольного сигнала в гармонический.

В первом блоке в зависимости от значения младшего разряда Δ_1 поступающего кода коммутатор подает на вход сумматора частоту 500 кГц, если этот разряд равен нулю, или 750 кГц, если этот разряд равен единице. Далее эта частота складывается с входной частотой 500 кГц, в результате получается частота, равная 1000 кГц, если код равен нулю, либо 1250 кГц, если код равен единице. Эта частота делится пополам, что дает $F_{21} = 500 \text{ кГц} + \Delta_1 \cdot 125 \text{ кГц}$.

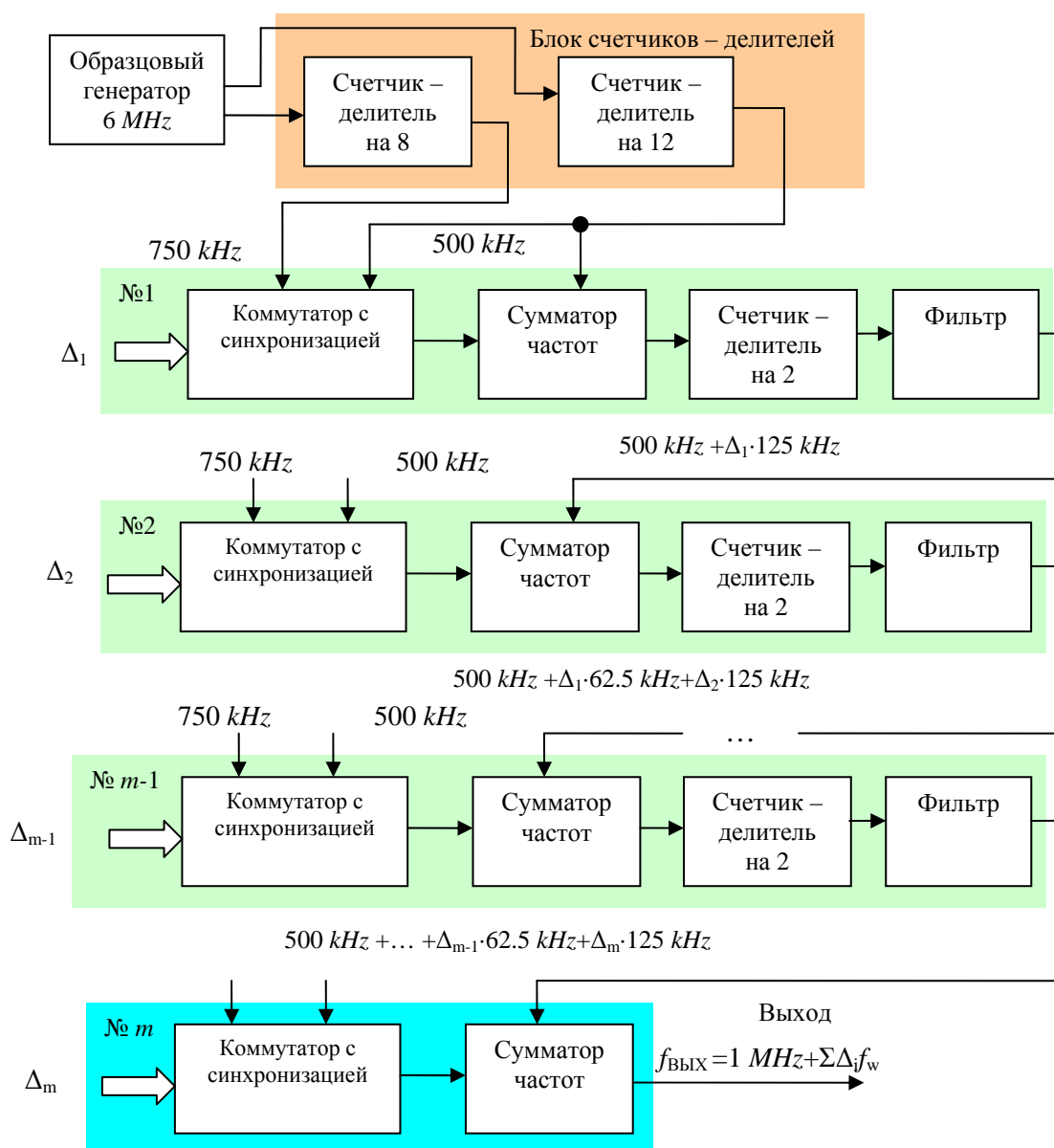


Рис. 9. Функциональная схема синтезатора

Следующий блок работает аналогично, но при сложении используется частота F_{21} . В результате на выходе этого блока формируется частота, равная $F_{22} = 500 \text{ кГц} + \Delta_2 \cdot 125 \text{ кГц} + \Delta_1 \cdot 62,5 \text{ кГц}$. Далее на следующем блоке эта частота опять используется как входная, в

результате чего формируется новая частота $F_{23} = 500 \text{ кГц} + \Delta_3 \cdot 125 \text{ кГц} + \Delta_2 \cdot 62,5 \text{ кГц} + \Delta_1 \cdot 31,25 \text{ кГц}$. Каждый последующий блок предыдущие добавки уменьшает по величине вдвое и добавляет собственную добавку частоты в зависимости от значения соответствующего

разряда, управляющего выходной частотой синтезатора.

Оконечный каскад не содержит счетчика-делителя, поскольку в лазерных системах требуется синтезатор на несущей частоте, равной 1 MHz , что и получается в данном случае.

Очевидными достоинствами предлагаемого синтезатора частот являются следующие его особенности:

1. Отсутствие подсистем ФАПЧ, что существенно упрощает его схему.

2. Возможность сколь угодно уменьшать шаг управления, т.е. увеличивать точность формирования предписанной частоты путем добавления идентичных простейших подблоков.

3. Крайне простые условия для расчета всех фильтров.

4. Отсутствие необходимости отладки узлов при отлаженном прототипе одного узла (вследствие простоты и идентичности), что упрощает тиражирование и эксплуатацию, а также ремонт.

5. Предельно малое количество требуемых образцовых частот (всего две), которые легко могут быть получены из единственной частоты, и как следствие – возможность внешнего задания образцовой частоты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Многочисленное моделирование с различными исходными значениями кодов и при их переключениях на различные новые значения показали, что в сигналах, формируемых в промежуточных блоках, названных октавами, скачки фазы отсутствуют, при этом частота изменяется скачком к нужному значению. В выходных сигналах этих блоков частота изменяется более плавно, но фазовые скачки также отсутствуют. В итоговом сигнале также скачки фазы отсутствуют. Этот результат моделирования не является неожиданным, поскольку по самому принципу формирования сигналов скачки фазы исключены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статья предлагает новую схему прецизионного синтезатора частоты с сверхмалым шагом. Эта схема легко изготавливается, настраивается и тиражируется. Она более проста, чем все известные, а также ранее предложенные и разработанные, включая разработки авторов этой публикации. Схема, как и ее прототипы, позволяет наращивать точность (уменьшать шаг частотной сетки) за счет добавления идентичных узлов, но эти узлы предельно просты вследствие отсутствия подсистем ФАПЧ. Описанный синтезатор может применяться в системах прецизионной фазовой автоподстройки в составе аппаратуры обработки сигналов. Шаг управления может быть сколь угодно уменьшен. При этом формируемая частота характеризуется точ-

ностью и стабильностью образцового генератора. Это особенно важно при создании систем для фундаментальной лазерной метрологии (в абсолютных частотных измерениях).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bagaev S.N., Belkin A.M., Dychkov A.S. et al. Absolute frequency measurement of molecular Iodine reference line near 732 nm used for high precision spectroscopy of Muonium. Russian-German Laser Symposium. Novosibirsk, 27.06–1.07.97. Technical digest. P. P12–P13.
- [2] Bagaev S.N., Belkin, A.M., Dychkov A.S. et al. Frequency reference in the 732-nm region for precision laser spectroscopy of muonium. 2000 Quantum Electronics. 30(7). P. 641–646.
- [3] Bagayev S.N., Belkin A.M., Dychkov A.S. et al. Absolute Frequency Measurements in Precision Laser Spectroscopy of Muonium. In collection: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Proceedings of the 1998 Nonlinear Optical Phenomena and Coherent Optics in Information Technologies, ICONO-98. Moscow, RUS, 1999. P. 310–318.
- [4] Zhmud V.A., Barmasov S.V., Gitel'son V.D. An electronic system for stabilizing the frequency of the He-Ne laser to the methane absorption lines. 1999 Instruments and Experimental Techniques. 42(4), P. 551–557.
- [5] Zhmud V., Dimitrov L., Yadrishnikov O. Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of the numerical optimization method 20152014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014 – Proceedings. 7040784, P. 739-744
- [6] Efimov A.S., Zhmud' V.A. A frequency synthesizer with the supersmall step for the systems of frequency and phase autotuning. 1996 Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya). (2), P. 21-25.
- [7] DAC38RFxx Dual-Channel, Single-Ended, 14-Bit, 6- and 9-GSPS, RF-Sampling DAC with JESD204B Interface and On-Chip GSM PLL. <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=SLASEF4&fileType=pdf>
- [8] Frequency Synthesizer Types. URL: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/pll-synthesizers/frequency-synthesizer-introduction-types.php>
- [9] What is an RF Frequency Synthesizer: technology & types. URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/frequency-synthesizer/synthesizer-types-introduction.php>
- [10] Ask the Applications Engineer – 30: PLL Synthesizers. Fox A. <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/pll-synthesizers.html>
- [11] M. Farazian et al., Fast Hopping Frequency Generation in Digital CMOS. Springer Science+Business Media New York 2013. Architectures for Frequency Synthesizers. URL: http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9781461404897-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1355443-p174127461
- [12] Lu T.-Y., Chen W.-Z. (2008) A 3-to-10GHz 14-band CMOS frequency synthesizer with spurs reduction for MB-OFDM UWB system. IEEE ISSCC digest of technical papers, P. 126–601, Feb 2008.
- [13] Liang C.-F., Liu S.-I., Chen Y.-H., Yang T.-Y., Ma G.-K. (2006) A 14-band frequency synthesizer for

MB-OFDM UWB application. IEEE ISSCC digest of technical papers, P. 428–437, Feb 2006.

- [14] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Ivoilov A. Yu. Precision Frequency Synthesizer. *Automatics & Software Engineering*. 2018. № 1 (23). P. 20–32. <http://www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-1-2018-2.pdf>.



Вадим Аркадьевич Жмудь - заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.

E-mail: oao_nips@bk.ru

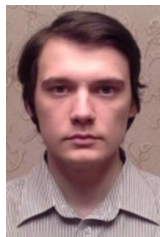
630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, д. 20



Любомир Ванков Димитров – Проректор Технического университета Софии (София, Болгария), доктор технических наук, профессор, почетный доктор НГТУ.

E-mail: lubomir_dimitrov@tu-sofia.bg

Бул. „св. Климент Охридски“ 8, 1756 Студентски Комплекс, София, Болгария



Андрей Юрьевич Ивойлов - аспирант кафедры Автоматики НГТУ.

E-mail: iau13hv@mail.ru

630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, д. 20

Статья поступила в редакцию 12 февраля 2018 г.

Effective Simplification of a Precision Frequency Synthesizer

V.A. Zhmud¹, L.V. Dimitrov², A.Yu. Ivoylov¹

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. 630090, K. Marx, 20.

²Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria. Blvd. "St. Clement Ohridski" 8, 1756

Abstract: Frequency synthesizers are generators whose frequency is controlled by a code. Such devices are manufactured by different firms, but it remains relevant to develop and synthesizers with special properties that serial products do not possess. Such properties include ultra-high accuracy of frequency generation depending only on the code, which sets the required value of it and the frequency of the reference generator, which is usually hydrogen frequency standard or other. The most relevant are such synthesizers in problems of absolute frequency measurements. Known technical solutions do not meet specific requirements. It is necessary to avoid jumps in the signal when switching the control code and the smoothness of the phase change of the generated signal. Therefore, it is necessary to develop synthesizers with these properties. The accuracy of such synthesizers is enhanced by the addition of identical blocks. However, these blocks are still complex, so adding them generates a strong appreciation of the synthesizer. This article offers a new solution to this problem by developing simple blocks of refinement. Simplification is achieved due to the lack of phase-auto-tuning subsystems. The synthesizer contains the simplest block for the formation of only two reference frequencies, several identical blocks containing synchronized switches, frequency adders, frequency dividers and filters, the technical requirements to all these nodes being extremely simple. High characteristics of the device as a whole are achieved due to the organization of the signal conversion algorithm in it. The chosen frequency ratios greatly simplify the filters. The theoretical substantiation of the working capacity of all technical solutions, confirmed by modeling, is given, as well as the functional scheme of the synthesizer.

Key words: frequency synthesizer, precision oscillator, frequency autotuning, phase-locked loop, laser systems, frequency control, phase control

REFERENCES

- [1] Bagaev S.N., Belkin A.M., Dychkov A.S. et al. Absolute frequency measurement of molecular Iodine reference line near 732 nm used for high precision spectroscopy of Muonium. *Russian-German Laser Symposium*. Novosibirsk, 27.06–1.07.97. Technical digest. P. P12–P13.
- [2] Bagaev S.N., Belkin, A.M., Dychkov A.S. et al. Frequency reference in the 732-nm region for precision laser spectroscopy of muonium. *2000 Quantum Electronics*. 30(7), P. 641-646.
- [3] Bagayev S.N., Belkin A.M., Dychkov A.S. et al. Absolute Frequency Measurements in Precision Laser Spectroscopy of Muonium. In collection: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Proceedings of the 1998 Nonlinear Optical Phenomena and Coherent Optics in Information Technologies, ICONO-98*. Moscow, RUS, 1999. P. 310–318.
- [4] Zhmud V.A., Barmasov S.V., Gite'lon V.D. An electronic system for stabilizing the frequency of the He-Ne laser to the methane absorption lines. *1999. Instruments and Experimental Techniques*. 42(4), P. 551–557.
- [5] Zhmud V., Dimitrov L., Yadrishnikov O. Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of the numerical optimization method 20152014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014 – Proceedings. 7040784, P. 739–744.
- [6] Efimov, A.S., Zhmud', V.A. A frequency synthesizer with the supersmall step for the systems of frequency and phase autotuning. *1996 Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya)*. (2), P. 21–25.

- [7] DAC38RFxx Dual-Channel, Single-Ended, 14-Bit, 6- and 9-GSPS, RF-Sampling DAC With JESD204B Interface and On-Chip GSM PLL. <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=SLASEF4&fileType=pdf>
- [8] Frequency Synthesiser Types. URL: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/pll-synthesizers/frequency-synthesiser-introduction-types.php>
- [9] What is an RF Frequency Synthesiser: technology & types. URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/frequency-synthesizer/synthesizer-types-introduction.php>
- [10] Ask the Applications Engineer – 30: PLL Synthesizers. Fox A. <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/pll-synthesizers.html>
- [11] M. Farazian et al., Fast Hopping Frequency Generation in Digital CMOS. Springer Science+Business Media New York 2013. Architectures for Frequency Synthesizers. URL: <http://www.springer.com/cda/content/document/cda-downloadaddocument/9781461404897-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1355443-p174127461>
- [12] Lu T-Y, Chen W-Z (2008) A 3-to-10GHz 14-band CMOS frequency synthesizer with spurs reduction for MB-OFDM UWB system. IEEE ISSCC digest of technical papers, P. 126–601, Feb 2008.
- [13] Liang C-F, Liu S-I, Chen Y-H, Yang T-Y, Ma G-K (2006) A 14-band frequency synthesizer for MB-OFDM UWB application. IEEE ISSCC digest of technical papers, P. 428–437, Feb 2006.
- [14] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Ivoilov A. Yu. Precision Frequency Synthesizer. Automatics & Software Engireery. 2018. № 1 (23). P. 20–32.

<http://www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-1-2018-2.pdf>.



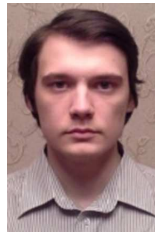
Vadim Arkadievich Zhmud – Head of the Department of Automation in NSTU, Professor, Doctor of Technical Sciences. E-mail: oao_nips@bk.ru

630073, Novosibirsk, str. Prosp. K. Marksa, h. 20



Lubomir Vankov Dimitrov - Vice-Rector of the Technical University of Sofia (Sofia, Bulgaria), Doctor of Science, Professor, Honorary Doctor of the NSTU. E-mail: lubomir_dimitrov@tu-sofia.bg

Bul. "St. Kliment Ohridski" 8, 1756 Studentski Complex, Sofia, Bulgaria



Andrey Yurievich Ivoylov – PhD-student of Department of Automatics of NSTU. E-mail: jau13hv@mail.ru

630073, Novosibirsk, str. Prosp. K. Marksa, h. 20

Paper was received 12 February, 2018 г.