

Плавное управление прецизионным синтезатором частот

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: Прецизионный синтезатор частот является одной из важнейших компонент лазерных систем, которые широко применяются для создания высокостабильных эталонов частоты, а также для абсолютных частотных измерений. Хотя в этой области имеется множество готовых разработок, большинство из них не соответствуют высочайшим требованиям, предъявляемым к таким синтезаторам по части плавности переключения частоты. Плавность должна состоять в отсутствии скачков фазы или амплитуды. Современные разработки в этой области очень часто излишне сложны. Упрощение таких устройств при обеспечении указанных характеристик может быть обеспечено за счет отказа от фазовых подсистем автоподстройки в промежуточных узлах. В этом случае такие подсистемы можно заменить простыми коммутаторами различных частот в зависимости от значения частоты, которую требуется синтезировать. Это ранее не практиковалось, так как переключение сигналов разных частот неизбежно должно вызвать скачки в формируемом сигнале в момент переключения. Поэтому такой подход кажется противоречащим поставленной задаче. В данной статье исследуются пути решения задачи плавного переключения сигналов таким образом, чтобы на выходе переключателя частота претерпевала изменение, однако в формируемом сигнале не было бы скачков фазы. Дан анализ путей решения этой задачи, приводится функциональная схема для переключателя, обеспечивающего требуемое плавное переключение, надежная и корректная работа переключателя подтверждена приводимыми результатами моделирования.

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

ВВЕДЕНИЕ

Одно из важнейших направлений использования лазерных систем состоит в использовании их в качестве источников наиболее стабильной частоты. В лазерных системах осуществляются многие преобразования оптических частот, включая фазовую привязку одного лазера к другому, получение разностных частот в радиочастотном диапазоне, управление этими частотами путем воздействия на частоту лазерного излучения и так далее. Одна из ключевых подзадач состоит в прецизионном управлении частотой излучения, что обеспечивается путем привязки получаемой разностной частоты к образцовой частоте, которую формирует синтезатор с предельно малым шагом управления [1–6]. Для решения этих задач изготавливаются синтезаторы [7–14]. Однако не каждый синтезатор может быть использован в такой задаче, а лишь такие, которые позволяют неограниченно уменьшать шаг управления за счет наращивания идентичных узлов [7, 14]. Самые последние разработки в этой области все же излишне сложны, поскольку требуют использования большого количества фазовых подсистем привязки частоты для промежуточных управляемых генераторов, которые используются в указанных идентичных узлах

[14]. Функциональную схему такого синтезатора можно в достаточной степени упростить, однако для этого требуется решение задачи переключения двух частот таким образом, чтобы в момент переключения не возникало никаких скачков в формируемом сигнале, т.е. чтобы сигнал на выходе переключателя в итоге плавно изменял свою частоту, но не изменял резко свое значение. Данная статья посвящена решению этой задачи.

1. УТОЧНЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЮ

Упрощенная функциональная схема предлагаемого синтезатора показана на *Рис. 1*. В этом устройстве образцовый генератор формирует только две частоты, а именно: $F_1 = 500 \text{ kHz}$ и $F_2 = 750 \text{ kHz}$. Кроме того, в нем имеется необходимое количество блоков уточнения частот. Каждый такой блок содержит коммутатор, представляющий собой проблему, которая обсуждается в данной статье, а также относительно простые узлы: сумматор частот и счетчик-делитель на два и фильтр. Сумматор частот состоит из перемножителя частот, высокочастотного фильтра и оконечного каскада (компаратора или триггера), обеспечивающий преобразование сигнала в цифровой. Фильтр выходе каждого счетчика-делителя

служит для преобразования прямоугольного сигнала в гармонический.

Принцип действия этого синтезатора можно понять из функциональной схемы.

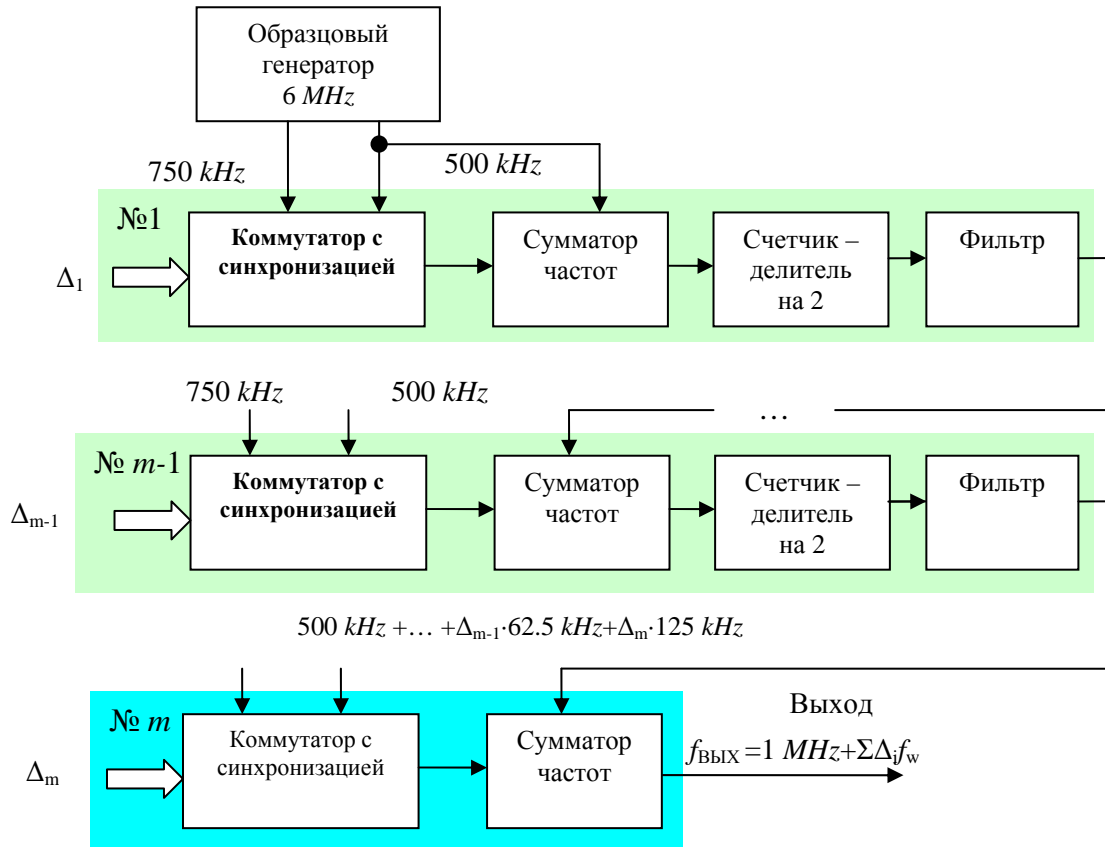


Рис. 1. Функциональная схема синтезатора

На Рис. 2 показана моделирования процесса схема преобразования частот в программе VisSim. При работе этой схемы каждая частота скачком изменяется с большего значения на меньшее значение, причем сначала срабатывает ключ, управляемый старшим разрядом кода, затем следующим, и так далее, в конце срабатывает ключ, управляемый младшим разрядом. Результат моделирования показан на Рис. 3, видно, что срабатывание ключа старшего разряда дает наибольший скачок, скачок от срабатывания каждого последующего разряда вдвое меньше скачка от предшествующего разряда. В зависимости входного кода может быть получена любая частота в интервале от $F_{\min} = 1$ до $F_{\max} = 1,5$ МГц.

Таким образом, задача синтеза частоты полностью решена за исключением подзадачи переключения сигналов двух частот таким образом, чтобы не было скачка фазы. При этом речь идет о переключении фиксированных частот $F_1 = 500$ кГц и $F_2 = 750$ кГц. Оба этих сигнала формируются от образцового генератора, что позволяет обеспечить следующие условия: эти сигналы имеют одинаковую амплитуду, каждый третий переход через ноль сигнала частоты F_1 совпадает с каждым вторым переходом через ноль сигнала частоты F_2 , как показано на Рис. 4. Можно

спроектировать коммутатор, который переключает сигналы только в эти моменты, а в другие моменты времени переключение запрещено.

Постановку задачи можно усложнить, установив такое требование, чтобы переключение происходило плавно даже в том случае, если изначальная синхронизация не осуществлена. Такое расширение функций коммутатора позволит переключать без скачков сигналы таких частот, которые не кратны, что позволит в дальнейшем не привязываться к первому условию, что дает дополнительные возможности по выбору частот. Это может упростить синтезатор при некоторых особых требованиях к нему.

Можно оценить, насколько часто будут совпадать фазы двух гармонических сигналов. Простые рассуждения приводят к выводу, что эта ситуация будет повторяться с периодом, соответствующим разностной частоте. Чем ближе частоты, которые приходится переключать, тем реже возникают моменты, когда переключение без скачков фазы возможно. Если частоты отличаются на 10%, то переключение возможно один раз на десять периодов меньшей частоты, что соответствует одиннадцати периодам большей частоты. Если частоты отличаются на 1%, переключение

возможно один раз на приблизительно сто периодов.

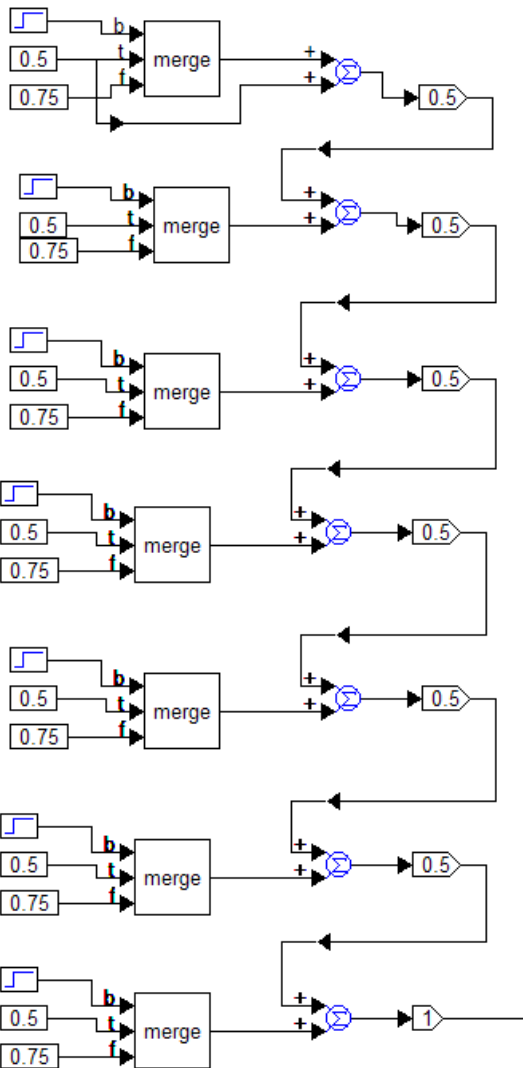


Рис. 2. Схема для моделирования процесса формирования нужной частоты в синтезаторе

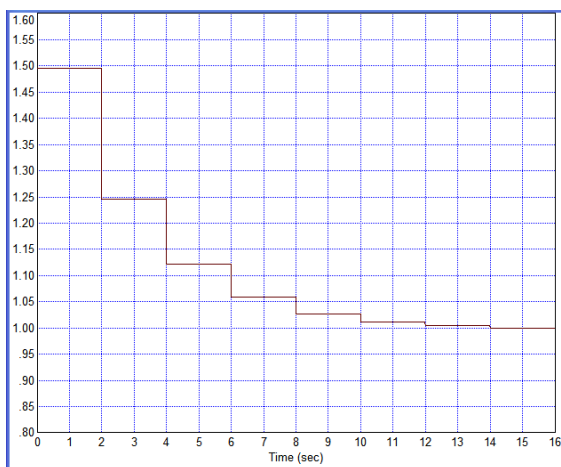


Рис. 3. Результат моделирования процесса формирования нужной частоты в синтезаторе

При выбранном соотношении частот возможность их переключения без фазовых скачков повторяется с интервалом, равным двум

периодам меньшей частоты, что равно трем периодам большей частоты, т.е. примерно через каждые 6,67 мс. Это можно считать достаточно высоким быстродействием. В системе управления лазерным спектрометром переключения частоты должны осуществляться реже, чем один раз в секунду. Таким образом, предлагаемое техническое решение более чем в 100 раз по быстродействию соответствует поставленной задаче.

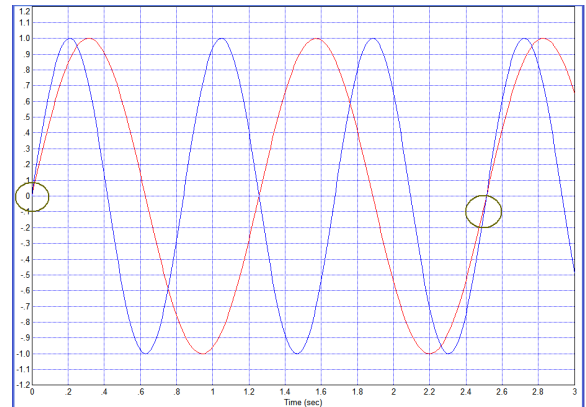


Рис. 4. Иллюстрация того факта, что при изначальной синхронности частот $F_1 = 500 \text{ kHz}$ и $F_2 = 750 \text{ kHz}$ ситуация синхронности регулярно повторяется (единицы времени на графике условные)

2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЮ

Если первое требование выполнено и сигналы переключаемых частот синхронизированы изначально, как показано на Рис. 4, то логика срабатывания синтезатора должна обеспечить выявление таких состояний обоих этих сигналов, когда из значения одновременно близки к нулю, и значения их производных совпадают по знаку. Можно отметить, что при этом соотношения абсолютных значений этих производных соотносятся так же, как соотносятся их частоты, т.е. как два к трем.

Если сигналы не синхронизированы изначально, то это условие следует несколько видоизменить. Переключение следует осуществлять в тот момент, когда значения этих сигналов близки друг к другу, а значения их производных совпадают по знаку и соотносятся как два к трем. Устройство для распознавания этой ситуации и формирования переключающего сигнала показано на Рис. 5. Оно содержит вычислитель разности сигналов, вычислитель разности с коэффициентом, дифференцирующее устройство, два вычислителя абсолютной величины, сумматор с тремя входами, масштабные усилители и логический инвертор. Также на устройстве обозначены шины сигналов x , y , z для того, чтобы использовать эти сигналы в других частях переключателя. На сумматор с тремя входами подается дополнительное смещение, равное $-0,02$. Это

позволяет формировать сигнал не строго в момент равенства нуля вычисляемого сигнала, а на несколько более длительном интервале, в

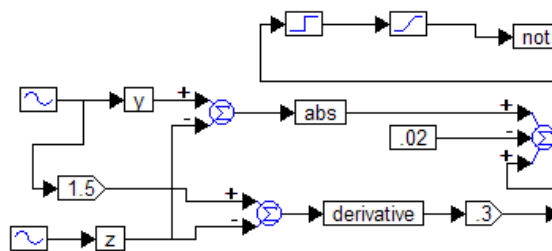


Рис. 5. Устройство для формирования переключающего сигнала

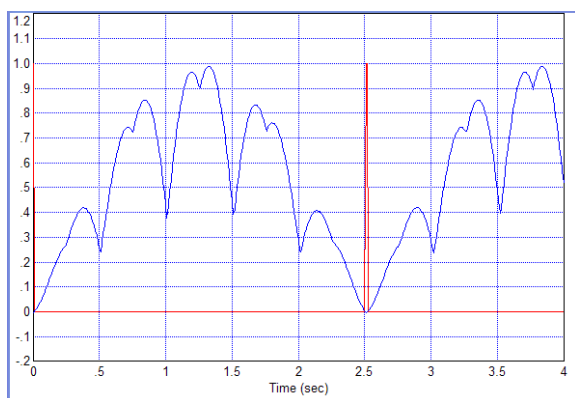


Рис. 6. Сигналы в устройстве по Рис. 5

Сигнал, формируемый в устройстве по Рис. 5, далее используется для синхронизации сигнала переключения. С этой целью может быть использован триггер с динамическим входом синхронизации, но в программе *VisSim* такого триггера не найдено, поэтому использовано устройство выборки-хранения. Схема этого устройства и формируемый сигнал показаны на Рис. 7. Далее сформированный сигнал, фронт которого совпадает с моментом равенства переключаемых сигналов и требуемого соотношения их производных, используется для переключения сигналов. На Рис. 8 показана схема переключателя и сигнал на его выходе. Видно, что в момент времени $t = 2,5$ с (условное время), когда сформирован короткий импульс, показанный на Рис. 6, формируется фронт переключающего сигнала, показанного на Рис. 7. Именно в этот момент времени происходит переключение частоты сигнала.

Для чистоты эксперимента можем задать любой начальный сдвиг в любой из переключаемых сигналов, или в оба. Например, зададим в первый сигнал сдвиг, равный 1,2 с. В этом случае значения переключаемых сигналов будут совпадать не при нулевом их значении, а при другом, которое равно примерно 0,8 в момент времени примерно 2,6 с. Именно в этот момент

противном случае формируемый сигнал имел бы нулевую длительность. Получаемые сигналы показаны на Рис. 6.

схема осуществляет переключение. На Рис. 9 показана работа переключателя в оба направления. По предписанному сигналу переключатель должен был переключить частоту с большей на меньшую в момент времени, равный 1 с, а затем с меньшей частоты на большую в момент времени, равный 4,5 с. Схема по Рис. 7 сформировала сигнал управления, начинающийся в момент около 2,6 с, и обрывающийся в ноль в момент, равный примерно 5,2 с. Именно в эти моменты осуществлено переключение.

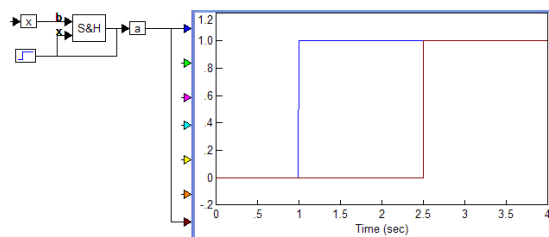


Рис. 7. Устройство синхронизации и сигналы, формируемые в нем

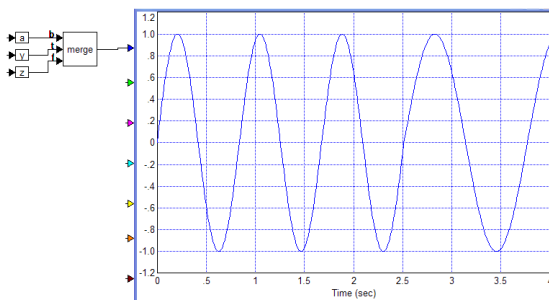


Рис. 8. Блок переключения и формируемый им сигнал

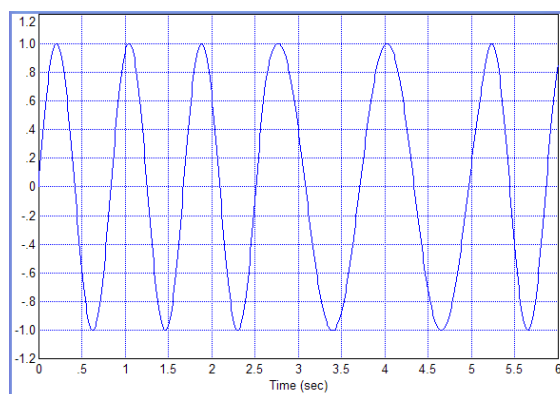


Рис. 9. Результат переключения сигнала от большей частоты к меньшей и обратно

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В статье предложен метод переключения гармонических сигналов фиксированной частоты для формирования сигнала с изменяющейся частотой. При этом требовалось отсутствие скачков фазы. Предложенный метод опробован моделированием, которое подтвердило его работоспособность и полное соответствие получаемым результатам тем требованиям, которые выдвигались при разработке этого устройства. Если частоты соотносятся как целые числа, то может иметь или не иметь место изначальная синхронизация коммутируемых сигналов. Моделирование подтвердило, что предложенное устройство успешно работает вне зависимости от такой синхронизации, т. е. такая синхронизация не требуется. Предложенное устройство может быть успешно применено в разработке прецизионных синтезаторов частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статья обосновывает возможность создания новой схемы прецизионного синтезатора частоты со сверхмалым шагом. Наиболее острым вопросом создания такого устройства является плавное переключение сигналов, имеющих разную частоту. Показано, что при фиксированном соотношении частот эта задача может быть успешно решена даже если сигналы изначально не синхронизованы. Внешняя команда переключения в виде прямоугольного импульса лишь подготавливает переключение. Само переключение осуществляется в наиболее благоприятные моменты, когда сигналы совпадают по величине, а их производные имеют один и тот же знак, а соотношение между ними соответствует кратности переключаемых частот. Предложена структурная схема, которая собрана в программе *VisSim*, что позволило промоделировать работу переключателя и на получаемых сигналах продемонстрировать эффективность предложенной схемы.

ЛИТЕРАТУРА

[1] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov 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] Bagayev, S.N., Belkin, A.M., Dychkov, A.S., High-stable compact Nd:YAG/¹²⁷I₂-laser system for precision measurements. 1996 Technical Digest - European Quantum Electronics Conference. P. 44.

[5] An electronic system for stabilizing the frequency of the He-Ne laser to the methane absorption lines. Zhmud, V.A., Barmasov, S.V., Gitel'son, V.D. 1999 Instruments and Experimental Techniques. 42(4), P. 551–557.

[6] Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of the numerical optimization method Zhmud, V., Dimitrov, L., Yadrishnikov, O. 20152014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014 – Proceedings. 7040784, c. 739-744

[7] A frequency synthesizer with the supersmall step for the systems of frequency and phase autotuning. Efimov, A.S., Zhmud', V.A. 1996 Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya). (2), P. 21-25.

[8] 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>

[9] Frequency Synthesiser Types. URL: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/pll-synthesizers/frequency-synthesiser-introduction-types.php>

[10] Leenaerts D, van de Beek R, Van der Weide G, Bergervoet J, Harish K, Waite H, Zhang Y, Razzell C, Roovers R, Res P et al (2005) A SiGe BiCMOS 1ns fast hopping frequency synthesizer for UWB radio. IEEE ISSCC digest of technical papers, pp 202–593, Feb 2005.

[11] Lee J, Chiu D (2005) A 7-band 3–8 GHz frequency synthesizer with 1 ns bandswitching time in 0.18 μm CMOS technology. IEEE ISSCC digest of technical papers, pp 204–593, Feb 2005.

[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, pp 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, pp 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>.



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

E-mail: oao_nips@bk.ru

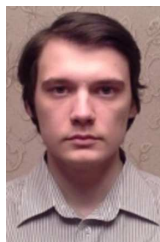
630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, д. 20



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 15 мая 2018 г.

Smooth Control of a Precision Frequency Synthesizer

V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov, A. Yu. Ivoilov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, str. Prospekt K. Marksa, h.20

Technical University of Sofia, Sofia. Str. Sv. Kliment Orkhidski 8, 1756

Abstract: A precision frequency synthesizer is one of the most important components of laser systems that are widely used to create highly stable frequency standards, as well as for absolute frequency measurements. Although there are many ready-made developments in this area, most of them do not meet the highest requirements for such synthesizers in terms of smooth frequency switching. Smoothness should consist in the absence of jumps of phase or amplitude. Modern developments in this area are often too complicated. Simplification of such devices while providing these characteristics can be achieved by avoiding the phase subsystems of auto-tuning in intermediate nodes. In this case, such subsystems can be replaced by simple commutators of different frequencies, depending on the value of the frequency that you want to synthesize. This was not previously practiced, since switching signals of different frequencies inevitably would cause jumps in the formed signal at the moment of switching. Therefore, this approach seems to contradict the task. In this paper, we investigate ways of solving the problem of smooth switching of signals in such a way that the frequency undergoes a change at the output of the switch, but there would be no phase jumps in the generated signal. An analysis of the ways of solving this problem is given, a functional diagram for the switch providing the required smooth switching is given, reliable and correct operation of the switch is confirmed by the results of the simulation.

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

REFERENCES

- [1] Absolute frequency measurement of molecular Iodine reference line near 732 nm used for high precision spectroscopy of Muonium. S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov et al. Russian-German Laser Symposium. Novosibirsk, 27.06–1.07.97. Technical digest. p. P12–P13.
- [2] Frequency reference in the 732-nm region for precision laser spectroscopy of muonium. Bagaev, S.N., Belkin, A.M., Dychkov, A.S. et al. 2000 Quantum Electronics. 30(7), c. 641-646
- [3] Absolute Frequency Measurements in Precision Laser Spectroscopy of Muonium. Bagayev S.N., Belkin A.M., Dychkov A.S. et al. 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. sponsors: Ministry Sci./Techn. Russian Fed., Russian Foundation for Basic Res., Ministry Ed. of the Russian Fed., Basic Optics/Spectrosc. Ed./Res.. Moscow, RUS, 1999. C. 310–318.
- [4] High-stable compact Nd:YAG/¹²⁷I₂-laser system for precision measurements. Bagayev, S.N., Belkin, A.M., Dychkov, A.S., 1996 Technical Digest - European Quantum Electronics Conference. c. 44
- [5] An electronic system for stabilizing the frequency of the He-Ne laser to the methane absorption lines. Zhmud, V.A., Barmasov, S.V., Gitel'son, V.D. 1999 Instruments and Experimental Techniques. 42(4), c. 551–557.
- [6] Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of the numerical optimization method Zhmud, V., Dimitrov, L., Yadrishnikov, O. 20152014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014 – Proceedings. 7040784, c. 739-744
- [7] A frequency synthesizer with the supersmall step for the systems of frequency and phase autotuning. Efimov, A.S., Zhmud', V.A. 1996 Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya). (2), P. 21–25.
- [8] 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.jsp?baseLiteratureNumber=SLASEF4&fileType=pdf>
- [9] Frequency Synthesiser Types. URL: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/pll-synthesizers/frequency-synthesiser-introduction-types.php>
- [10] Leenaerts D, van de Beek R, Van der Weide G, Bergervoet J, Harish K, Waite H, Zhang Y, Razzell C, Roovers R, Res P et al (2005) A SiGe BiCMOS Ins fast hopping frequency synthesizer for UWB radio. IEEE ISSCC digest of technical papers, pp 202–593, Feb 2005.

- [11] Lee J, Chiu D (2005) A 7-band 3–8 GHz frequency synthesizer with 1 ns bandswitching time in 0.18 μm CMOS technology. IEEE ISSCC digest of technical papers, pp 204–593, Feb 2005.
- [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, pp 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, pp 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

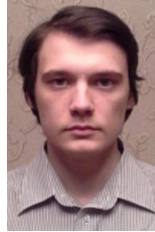
630073, Novosibirsk,
str. Prosp. K. Marksa, h. 20



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: iau13hv@mail.ru

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

The paper was received on May 15, 2018.