

УДК 621.373.8, 621.374, 621.376.3

Цифровой частотный детектор для метанового мобильного стандарта частоты

Д. А. Шелестов¹, Д. А. Тюриков², А. Б. Пнев³, М. А. Губин⁴

²к. ф.-м. н., ³к. т. н., ⁴д. ф.-м. н.

^{1,3}МГТУ им. Н. Э. Баумана, НОЦ «Фотоника и ИК-техника»,

^{2,4}Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

e-mail: dima.shelestov@gmail.com

Аннотация. Метановый оптический стандарт частоты перспективен для применений в прецизионных частотных измерениях, в частности является одним из кандидатов на роль мобильного (в том числе «бортового») стандарта частоты со стабильностью в диапазоне $5 \cdot 10^{-15}$ – $5 \cdot 10^{-16}$ для использования в частотно-временном сегменте ГНС ГЛОНАСС. Настоящая работа посвящена разработке цифрового частотного детектора, предназначенного для повышения кратковременной стабильности частоты метанового стандарта. Проведены расчеты точности алгоритмов цифрового счета частоты, численное моделирование работы ПЛИС, подтверждающее работу одиночного канала синхронно-частотного детектора на уровне девиации Аллана $1,4 \cdot 10^{-13}$ за 1 с, а также предложены техники увеличения точности счета, позволяющие измерить девиацию Аллана на уровне $5,6 \cdot 10^{-16}$ за 1 с.

Ключевые слова: мобильный оптический стандарт частоты, He–Ne/CH₄ стандарт частоты, резонанс насыщенной дисперсии, синхронный детектор, частотный детектор, девиация Аллана, кратковременная стабильность частоты, ГНС, ГЛОНАСС

Digital Frequency Detecting Device for Mobile Methane Frequency Standard

D. A. Shelestov¹, D. A. Tyurikov², A. B. Pnev³, M. A. Gubin⁴

²candidate of physics and mathematics, ³candidate of engineering science, ⁴doctor of physics and mathematics

^{1,3}Bauman Moscow State Technical University, scientific-educational center “Fotonika i IK-tehnika”,

^{2,4}Lebedev Physical Institute RAS

e-mail: dima.shelestov@gmail.com

Abstract. Utilization of methane optical frequency standard is promising for precision frequency measurements, in particular, it is a possible future mobile (and on-board) frequency standard with stability of $5 \cdot 10^{-15}$ – $5 \cdot 10^{-16}$, which will be used in frequency-time segment of GNS GLONASS. This paper deals with development of a digital frequency detector, designed to increase the methane standard short-term frequency stability. Accuracy of digital frequency counting algorithms is calculated. A numerical simulation of programmable logic device operation is conducted, which confirms the operability of a single channel synchronous-frequency detector with Allan variance of $1,4 \cdot 10^{-13}$ per 1 s, and also provides a technology to increase the accuracy of the counting, allowing one to measure the Allan variance at $5,6 \cdot 10^{-16}$ per 1 s.

Keywords: mobile optical frequency standard, He–Ne/CH₄ frequency standard, resonance of saturated dispersion, synchronous detector, frequency detector, Allan variance, short-term frequency stability, GNSS, GLONASS

Введение

С момента появления в начале 2000-х гг. компактного способа связи между оптическим и радиодиапазонами [1] (ранее эта задача решалась сложнейшими уникальными системами [2]) стало возможно доставить потребителю повышенную стабильность частоты, свойственную оптическому диапазону. Это привело к тому, что сферы применения радио- и оптических стандартов частоты (СЧ), ранее четко разделенные, пересеклись. Большое внимание сегодня уделяется разработке различных типов оптических стандартов частоты (ОСЧ), в том числе космического базирования [3]. Открылся целый класс фундаментальных научных задач, ранее не формулировавшихся и решаемых только с помощью ОСЧ [4]. Одно из направлений работ — создание бортовых ОСЧ, допускающих установку в негерметизированных отсеках, на внешней поверхности космического аппарата (КА) и способных заменить использующиеся сегодня бортовые микроволновые СЧ (МСЧ). Однако для создания законченного ОСЧ космического базирования еще предстоит решить ряд научно-технических и технологических задач.

Гораздо более близкая к реализации задача — создание задающих генераторов с кратковременной стабильностью частоты, превосходящей на 2–3 порядка лучшие кварцевые генераторы, используемые в эталонах и хранителях времени/частоты. Создание высокостабильных компактных задающих генераторов важно для:

- повышения точности и радикального сокращения времени выхода на номинальную точность эталонов и хранителей частоты «фонтанного» типа на атомах Cs, Rb, составляющих основу наземной части частотно-временного сегмента ГНС «ГЛОНАСС»;

- повышения углового разрешения сети радиointерферометров со сверхдлинной базой (система «Квазар»), с помощью которой решается целый спектр научных и прикладных задач в области астрономии, картографии, геодинамики, космической навигации.

Важное структурное различие между МСЧ и ОСЧ с точки зрения применения в радиодиапазоне — это обязательное для ОСЧ наличие де-

лителя частоты на основе лазера ультракоротких импульсов. Такие делители существуют и активно совершенствуются, в том числе и для He–Ne/CH₄ ОСЧ [5].

Среди большого количества ОСЧ, разрабатываемых различными группами по всему миру, к числу наиболее близких к космическому исполнению можно выделить два: метановый ОСЧ (He–Ne/CH₄) [6] и йодный ОСЧ (Nd:YAG/I₂) [4]. Существующая версия йодного ОСЧ, разрабатываемого совместно рядом университетов Германии, имеет размер 550 × 250 × 50 мм и демонстрирует стабильность частоты $2 \cdot 10^{-14}$ за 1 с. Многие стандартные узлы системы заимствованы из других оптических приборов, уже эксплуатируемых в космосе.

Текущая версия метанового ОСЧ выполнена в едином ситалловом корпусе размером 240 × 230 × 50 мм, конструктивно объединяющем резонатор He–Ne-лазера и кювету с метаном (рис. 1.). Значение девиации Аллана, достигнутой при помощи стандарта, составляет $1 \cdot 10^{-14}$ за 1 с [7]. Особенностью этого типа ОСЧ является оптический дискриминатор на основе двухмодового лазера, позволяющий детектировать сигнал насыщенной дисперсии спектральной линии метана с высокой чувствительностью [8]. Достигнутые на сегодняшний день параметры метанового квантового дискриминатора показывают, что в данной системе возможно получение девиации Аллана $(1-3) \cdot 10^{-15}$ за 1 с для выходных сигналов на стандартных частотах 5 МГц, 10 МГц.

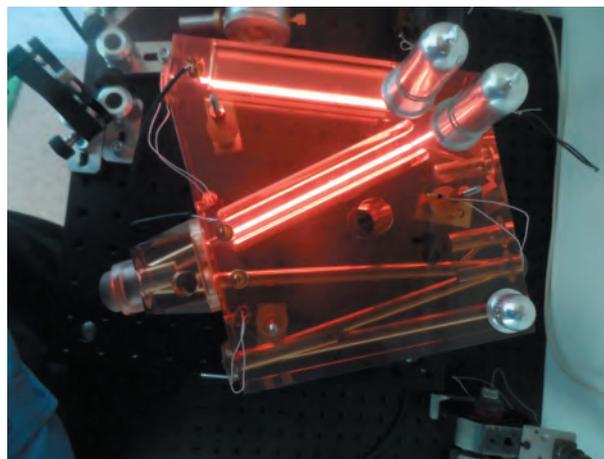


Рис. 1. Внешний вид ситаллового моноблока He–Ne/CH₄ ОСЧ

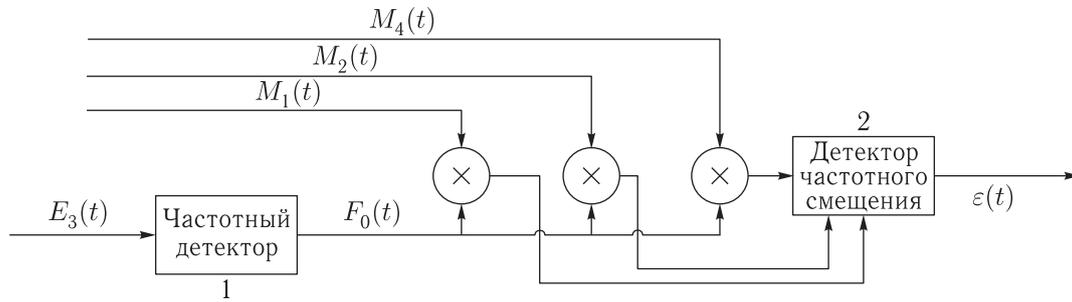


Рис. 2. Структурная схема алгоритма №1 ($E_3(t)$ — входной цифровой ЧМ-сигнал, $M_i(t)$ — опорный сигнал i -го синхронного детектора (СД), $F_0(t)$ — сигнал частоты, $\varepsilon(t)$ — сигнал частотного смещения)

Разработка метанового ОСЧ ведется по трем направлениям — повышение кратковременной (время усреднения $\tau \leq 1$ с), средневременной ($1 \text{ с} < \tau < 100$ с) и долговременной ($\tau > 100$ с) стабильностей. Для каждого случая ограничивающими являются различные факторы.

Так, для повышения кратковременной стабильности частоты необходимо модернизировать подсистему детектирования резонанса насыщенной дисперсии, ключевым элементом которой является частотный детектор.

Существующая аналоговая версия частотного детектора (ЧД) уже близка к предельно низкому значению шумов ($0,1 \text{ Гц/Гц}^{1/2}$) при частоте несущей 5 МГц. В связи с этим в данной работе предлагается конструкция цифрового частотного детектора на базе программируемых логических микросхем (ПЛИС), позволяющих в перспективе достигнуть уровня шумов $\sim 10^{-3} \text{ Гц/Гц}^{1/2}$. Решению данной задачи посвящена настоящая работа.

Цифровые алгоритмы счета частоты

Одним из преимуществ работы с ПЛИС является гибкость программируемой структуры. Это позволяет быстро создавать сложные комбинации базовых приемов счета. Далее показаны несколько базовых алгоритмов работы системы.

Первый алгоритм представляет собой две последовательные операции: сначала частотное детектирование, потом синхронное детектирование на основе измеренной частоты (рис. 2), причем

детектирование можно осуществлять на нескольких гармониках сразу.

Расчеты показали, что для определенного входного ЧМ-сигнала, характерного для He-Ne/CH₄-моноблока (несущая — 5 МГц, частота модуляции — 10 кГц, глубина модуляции — 100 кГц), абсолютная погрешность при определении положения несущей составит $\delta\nu = 300$ кГц. Достижимая минимальная девиация Аллана для времени усреднения $\tau = 0,1$ с показана в (1) и для $\tau = 1$ с — в (2) (число измерений за 1 с составляет $N = 10\,000$). Требование к разрабатываемой системе детектирования резонанса (не хуже $2 \cdot 10^{-15}$) не выполняется.

$$\sigma_{1_a}^{0,1 \text{ мс}} = \frac{\delta\nu}{\nu_{\text{CH}_4}} = \frac{300 \text{ кГц}}{88,5 \text{ ТГц}} = 3,4 \cdot 10^{-9}, \quad (1)$$

$$\tau = 0,1 \text{ мс},$$

$$\sigma_{1_a} = \frac{\delta\nu}{\sqrt{N} \cdot \nu_{\text{CH}_4}} = \frac{300 \text{ кГц}}{\sqrt{10\,000} \cdot 88,5 \text{ ТГц}} = 3,4 \cdot 10^{-11}, \quad \tau = 1 \text{ с}. \quad (2)$$

Второй алгоритм выполняет задачу синхронно-частотного детектирования, т.е. операции частотного и синхронного детектирования происходят слитно (рис. 3). Недостаток алгоритма — отсутствие явного значения несущей частоты, которое часто требуется для служебных целей. Однако в ПЛИС это легко решается установкой отдельного канала ЧД независимо от основного счета. Преимуществом же является существенно возросшая точность детектирования: абсолютная погрешность при определении положения несущей составит $\delta\nu = 1,26$ кГц. Девиация Аллана для этого

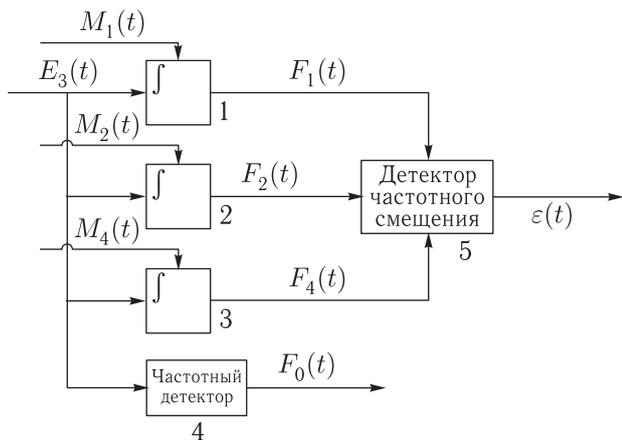


Рис. 3. Структурная схема алгоритма №2 ($E_3(t)$ — входной цифровой ЧМ-сигнал, $M_i(t)$ — опорный сигнал i -го синхронно-частотного детектора, $F_i(t)$ — выходной сигнал i -го частотно-синхронного детектора, $\varepsilon(t)$ — сигнал частотного смещения)

случая показана в (3) и (4). Тем не менее, желаемые показатели не достигнуты.

$$\sigma_{2_a}^{0,1 \text{ мс}} = \frac{\delta\nu}{\nu_{\text{CH}_4}} = \frac{1,26 \text{ кГц}}{88,5 \text{ ТГц}} = 1,4 \cdot 10^{-11}, \quad (3)$$

$$\tau = 0,1 \text{ мс},$$

$$\sigma_{2_a} = \frac{\delta\nu}{\sqrt{N} \cdot \nu_{\text{CH}_4}} = \frac{1,26 \text{ кГц}}{\sqrt{10\,000} \cdot 88,5 \text{ ТГц}} = 1,4 \cdot 10^{-13}, \quad \tau = 1 \text{ с}. \quad (4)$$

Для дальнейшего увеличения точности работы цифровой системы можно увеличить число каналов каскадированного счета, представляющих собой параллельно запущенный алгоритм синхронно-частотного детектирования, но без завершения предыдущей фазы. Для ПЛИС различного объема максимальное число таких каналов N_{cs} варьируется от 30 до 250 шт., данные которых с точки зрения ошибки счета некоррелированы. Так как девиация Аллана по математическим свойствам есть СКО, то влияние дополнительных каналов описывается выражением (5)

$$\sigma_{2_a}^+ = \frac{\sigma_{2_a}}{\sqrt{N_{cs}}} = \frac{1,4 \cdot 10^{-13}}{\sqrt{250}} = 8,8 \cdot 10^{-15}, \quad \tau = 1 \text{ с}. \quad (5)$$

Дополнительной техникой увеличения точности счета является косвенное увеличение такто-

вой частоты за счет запуска фазосмещенных тактовых сигналов. Число таких каналов ограничено внутренним джиттером ПЛИС и минимальным фазовым шагом. Так, для той же ПЛИС (джиттер 100 пс, минимальный фазовый сдвиг 250 пс) число так называемых *параллельных каналов счета* достигает $N_{\text{par}} = 16$. Влияние на девиацию Аллана показано в (6):

$$\sigma_{2_a}^+ = \frac{\sigma_{2_a}}{N_{\text{par}}} = \frac{1,4 \cdot 10^{-13}}{16} = 8,8 \cdot 10^{-15}, \quad \tau = 1 \text{ с}. \quad (6)$$

Объединению этих двух техник ничто не мешает, поэтому итоговая достижимая девиация Аллана достигнет величины (7), которая удовлетворяет поставленным условиям:

$$\sigma_{2_a}^+ = \frac{\sigma_{2_a}}{\sqrt{N_{cs}} \cdot N_{\text{par}}} = \frac{1,4 \cdot 10^{-13}}{\sqrt{250} \cdot 16} = 5,6 \cdot 10^{-16}, \quad (7)$$

$$\tau = 1 \text{ с}.$$

Реализация цифрового счета на базе ПЛИС

Реализация описанных алгоритмов происходит на базе отладочного модуля ПЛИС DE0 с добавлением интерфейсной платы, реализующей фильтрацию входного сигнала, цифро-аналоговые преобразования и согласование входных/выходных линий (рис. 4).

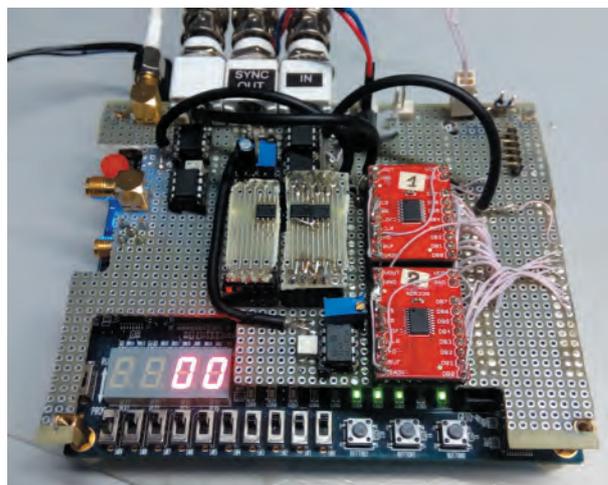


Рис. 4. Внешний вид цифрового отладочного модуля и интерфейсной платы

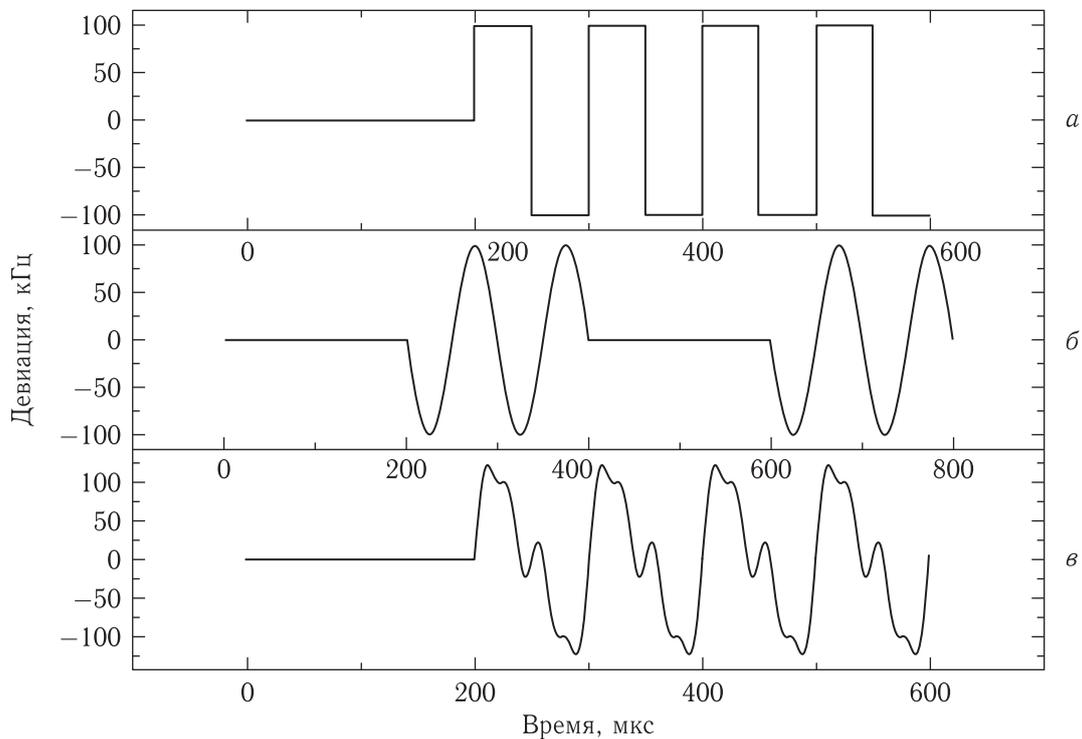


Рис. 5. ЧМ-сигналы для тестирования алгоритма, реализованного в ПЛИС

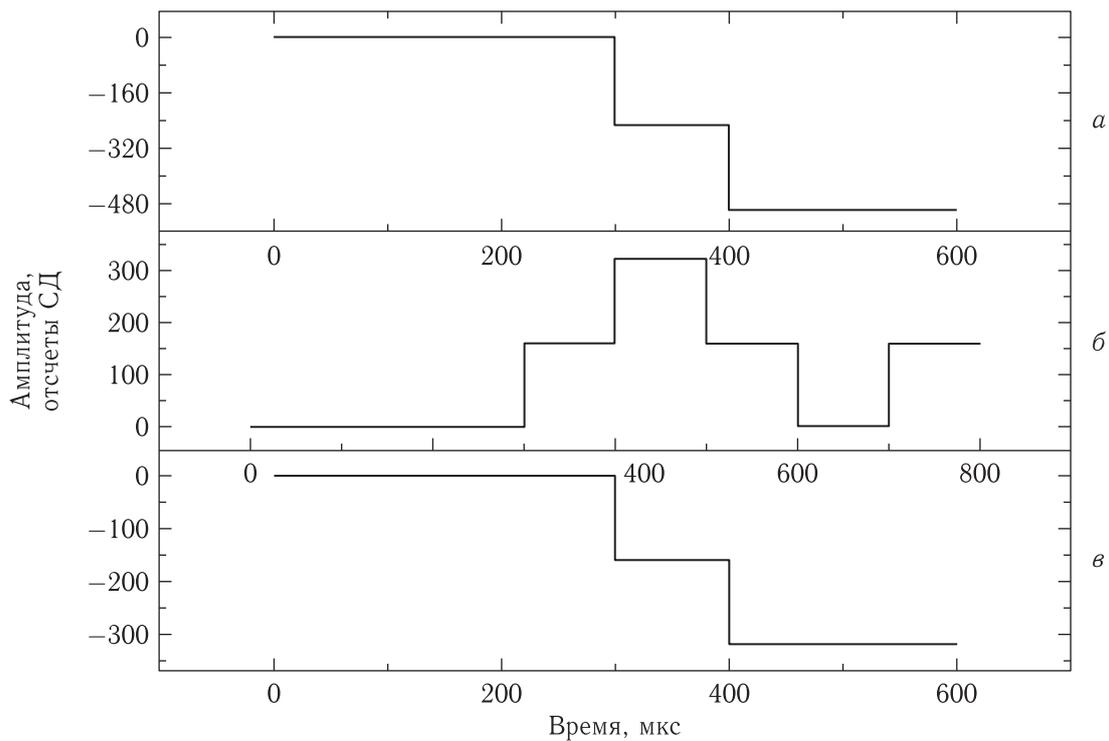


Рис. 6. Результат моделирования работы алгоритма № 2

Преимуществом использования цифровой схемотехники является развитая система численного моделирования работы ПЛИС, результаты которого очень близки к реальности. Для подтверждения соответствия между теоретической оценкой и реальной работой ПЛИС было проведено следующее моделирование.

На вход одиночного канала синхронно-частотного алгоритма были поданы модельные цифровые последовательности, эмулирующие входной ЧМ-сигнал (рис. 5).

Моделированный сигнал (а) представляет собой идеализированный случай ЧМ-модуляции в форме меандра, польза которого в том, что этот случай легко проверяется. Сигнал (б) эмулирует воздействие одиночной гармоники, а сигнал (в) — наиболее близкий к реальному, есть смесь гармоник с заранее известными амплитудами. Все сигналы представлены числовыми последовательностями как функциями времени.

Реакция цифровой системы, показанная на рис. 6, полностью подтверждает сделанные ранее расчеты. В случае (а) за 2 шага ЧД вышел на расчетное для меандра значение -500 . В случае (б) ЧД явно реагирует на появление/пропадание гармонического сигнала с расчетной амплитудой в 318 единиц. В случае (в) свойство синхронного детектора позволило в составе сложного сигнала выявить тот же сигнал, что был в случае (б).

Заключение

В работе обращается внимание на актуальность развития ОСЧ для модернизации частотно-временного сегмента ГНСС. Среди важных задач в этой области — разработка мобильного стандарта частоты радиодиапазона, сочетающего высокую кратковременную и долговременную стабильности частоты на уровне $5 \cdot 10^{-15}$ – $5 \cdot 10^{-16}$ (для времен усреднения $\tau = 1$ с–1 сут).

Одним из наиболее перспективных ОСЧ для достижения указанных параметров является «метановый» He–Ne/CH₄ ОСЧ. Компактность и жесткость созданных образцов метанового ОСЧ делает

его также перспективным для разработки в космическом исполнении.

Применение цифровых методов частотного детектирования на основе ПЛИС — необходимый шаг на пути реализации потенциально высокой стабильности ОСЧ. В работе показаны алгоритмы цифрового счета частоты, проведена оценка их точности, осуществлено моделирование, подтверждающее работу одиночного канала синхронно-частотного детектора, т. е. достижение девиации Аллана $1,4 \cdot 10^{-13}$ за 1 с. Предложены техники увеличения точности счета, позволяющие достичь девиацию Аллана на уровне $5,6 \cdot 10^{-16}$ за 1 с.

Список литературы

1. *Udem Th., Holzwarth R., Hansch T. W.* Optical frequency metrology // *Nature*, 2012, vol. 416, № 6877. P. 233–237.
2. *Pollock C. R., Jennings D. A., Petersen F. R. et al.* Direct frequency measurements of transitions at 520 THz (576 nm) in iodine and 260 THz (1,15M) in neon // *Opt. Lett.*, 1983., Mar. T. 8, № 3. P. 133–135.
3. *Gill P., Margolis H., Curtis A. et al.* Optical Atomic Clocks for Space // *NPL*, 2008. Nov. ver 1.7.
4. *Doringshoff K., Mohle K., Nagel M. et al.* High performance iodine frequency reference for tests of the LISA laser system // *EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum*. 2010. April. P. 1–6.
5. *Tausenev A. V., Kryukov P. G., Bubnov M. M. et al.* Efficient source of femtosecond pulses and its use for broadband supercontinuum generation // *Quantum Electronics*, 2005, т. 35, № 7. С. 581.
6. *Gubin M. A., Kireev A. N., Konyashchenko A. V. et al.* Realisation of a compact methane optical clock // *Quantum Electronics*, 2008, т. 38, № 7. С. 613.
7. *Величанский В. Л., Губин М. А.* Лазерные стандарты частоты в ФИАНе // *Успехи физических наук*, 2009, т. 179, № 11. С. 1219–1224.
8. *Gubin M. A., Protsenko E. D.* Laser frequency standards based on saturated-dispersion lines of methane // *Quantum Electronics*, 1997, т. 27, № 12. С. 1048.