

Алгоритмы управления в квантовых стандартах частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей

Данил Александрович Парёхин

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Меделеево, Московская обл., Россия, paryohin@vniiftri.ru

Аннотация. Рассмотрена задача разработки алгоритмов управления в квантовых стандартах частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей. Разработка таких алгоритмов позволит создавать стандарты частоты с метрологическими характеристиками, не уступающими характеристикам рубидиевых стандартов частоты, с уменьшенным энергопотреблением и габаритными размерами. Представлен метод исследования зависимости действительного значения и нестабильности частоты квантовых стандартов частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей от режимов работы отдельных частей стандартов. В качестве критерия для оптимизации тока инжекции лазера, выходной мощности сверхвысокочастотного генератора и температуры ячейки выбрана минимизация влияния на сдвиг действительного значения частоты стандарта. Проведён сравнительный анализ методов изменения интенсивности излучения поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором и разработаны алгоритмы управления, учитывающие особенности данных методов. На основе данных алгоритмов разработаны программное обеспечение и методы настройки в квантовых стандартах частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей. Для опытного образца стандарта приведены результаты измерения нестабильности частоты. Показано, что алгоритмы управления и методы настройки могут качественно изменить метрологические характеристики квантовых стандартов частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей.

Ключевые слова: квантовый стандарт частоты, когерентное пленение населённостей, система управления, поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором

Для цитирования: Парёхин Д. А. Алгоритмы управления в квантовых стандартах частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей // Измерительная техника. 2021. № 1. С. 27–31. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-1-27-31>

Control algorithms in quantum frequency standards based on the effect of coherent population trapping

Danil A. Paryohin

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region, Russia, paryohin@vniiftri.ru

Abstract. The problem of developing control algorithms in quantum frequency standards based on the effect of coherent population trapping is considered. The development of such algorithms will make it possible to create frequency standards with metrological characteristics that are not inferior to the characteristics of rubidium frequency standards, with reduced power consumption and overall dimensions. A method for studying the dependence of the actual value and frequency instability of quantum frequency standards based on the effect of coherent population trapping on the operating modes of individual parts of the standards is presented. As a criterion for optimizing the laser injection current, the output power of the microwave generator, and the cell temperature, we chose to minimize the effect on the shift of the actual frequency of the standard. A comparative analysis of methods for changing the radiation intensity of a surface-emitting laser with a vertical resonator has been carried out and control algorithms have been developed that take into account the features of these methods. Based on these algorithms, software and tuning methods have been developed in quantum frequency standards based on the effect of coherent population trapping. For the prototype standard, the results of measuring the frequency instability are shown. It is shown that control algorithms and tuning methods can qualitatively change the metrological characteristics of quantum frequency standards based on the effect of coherent population trapping.

Keywords: quantum frequency standard, coherent population trapping, control system, vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL)

Введение. Квантовые стандарты частоты (КСЧ) на основе атомов рубидия имеют высокие метрологические характеристики (малое отклонение действительного

значения частоты от номинального значения $\pm 2 \cdot 10^{-10}$; низкая нестабильность частоты, определяемая значением среднего квадратичного относительного двухвыборочного

отклонения частоты (СКДО) $6 \cdot 10^{-12}$ в интервале измерений 100 с), что позволяет применять их в таких областях народного хозяйства, как радионавигация, геодезия, метрология, радиоастрономия, связь, транспорт и наука. В зависимости от области применения КСЧ к их метрологическим (нестабильность частоты, отклонение действительного значения частоты, фазовый шум) и эксплуатационным (потребляемая мощность, габаритные размеры, время выхода на рабочий режим и непосредственно условия эксплуатации) характеристикам предъявляют различные требования. Следует отметить активно развивающееся направление создания малогабаритных КСЧ, которые могут быть интегрированы в качестве опорных генераторов частоты в различные технические устройства и системы: навигационные модули с использованием сигналов космических навигационных систем и инерциальных датчиков; системы защищённой связи с перебором частот; системы дистанционного зондирования Земли; беспилотные летательные аппараты; системы сбора и передачи данных и т. д. Для использования в таких системах малогабаритные КСЧ должны иметь следующие характеристики: СКДО $3,0 \cdot 10^{-11}$ в интервале измерений 1 с, габаритные размеры – менее 60 см^3 , энергопотребление – менее 300 мВт, время выхода на рабочий режим – менее 3 мин.

Наиболее перспективным вариантом малогабаритных высокостабильных КСЧ являются стандарты частоты, работающие на основе эффекта когерентного пленения населённости (КПН) (далее – КСЧ КПН) [1].

Эффект КПН проявляется под действием резонансного лазерного излучения: атом переходит в особое квантовое состояние, являющееся долгоживущей когерентной суперпозицией магнитных подуровней энергии основного состояния [2]. В таком состоянии атомы перестают рассеивать

резонансное излучение, поэтому его поглощение в среде резко уменьшается. Это также приводит к уменьшению флюоресценции атомов, из-за чего в литературе такие резонансы принято называть «тёмными». Одна из важнейших особенностей «тёмных» резонансов заключается в том, что их ширина, связанная с временем жизни «тёмного» состояния, может быть гораздо меньше естественной ширины спектральной линии и достигать сотен и единиц герц.

Для наблюдения «тёмных» резонансов можно использовать как одночастотные магнитооптические схемы возбуждения среды, так и многочастотные. В последнем случае, обычно используемом в КСЧ, спектр лазерного излучения содержит две оптические частоты, находящиеся в резонансе с соответствующими дипольными переходами в атомах. В случае с атомами щелочных металлов, имеющими только один электрон на внешней оболочке, предпочтительнее использовать линию D_1 для наблюдения резонансов КПН, поскольку в этом случае их контраст значительно выше, чем при использовании линии D_2 [3]. В КСЧ «тёмные» резонансы наблюдаются при сканировании разности частот. А именно, когда разность становится близка к микроволновой частоте сверхтонкого расщепления основного состояния в атоме, наблюдается узкий резонанс КПН. Таким образом, используя резонансы КПН, можно стабилизировать микроволновую частоту генератора.

Преимуществом КСЧ КПН по сравнению с малогабаритными рубидиевыми стандартами частоты [4] является отсутствие необходимости использования громоздкого сверхвысокочастотного (СВЧ) резонатора и спектральной лампы, заполненной парами щелочного металла (цезия, рубидия), имеющей высокое энергопотребление (порядка 0,5 Вт). Это даёт возможность при сохранении высоких метрологических характеристик существенно уменьшить габаритные размеры устройства и его энергопотребление.

Однако создание КСЧ КПН эффекта связано с необходимостью решения сложных технологических и научных задач:

необходимо разработать миниатюрные конструктивные элементы, лежащие в основе физической части квантового дискриминатора частоты. Такими элементами являются поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором и миниатюрная ячейка, заполненная буферными газами и парами щелочного металла;

поиск схмотехнических решений с целью уменьшения габаритных размеров устройства, сокращения потребляемой мощности и минимизации собственных шумов КСЧ;

создание алгоритмов и программного решения, обеспечивающих управление всеми узлами устройства, стабилизацию и точную регулировку температуры ячейки (относительная погрешность установки температуры ячейки не более $0,1^\circ \text{C}$), длины волны лазера, частоты СВЧ-генератора (абсолютная погрешность установки частоты не более 0,14 Гц), а также выход устройства на рабочий режим за время, не превышающее 3 мин при потребляемой мощности менее 300 мВт.

Основные источники шумов, влияющих на метрологические характеристики КСЧ, можно разделить на фундаментальные шумы, связанные с характеристиками физического

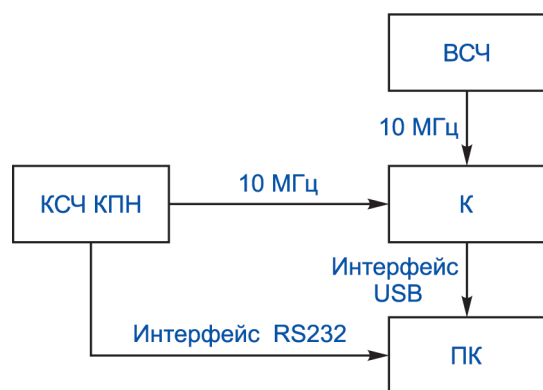


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:

КСЧ КПН – квантовый стандарт частоты на основе эффекта когерентного пленения населённости; ВЧ – водородный стандарт частоты Ч1-1006; К – частотный компаратор Ч7-315; ПК – персональный компьютер

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup:

QFS CPT – quantum frequency standard based on the effect of coherent population trapping; HFS – hydrogen frequency standard Ч1-1006; C – frequency comparator Ч7-315; PC – personal computer

блока дискриминатора частоты, и технические, связанные со схемотехническим решением и режимом работы узлов стандарта. Поэтому для обеспечения высоких метрологических характеристик КСЧ КПН необходимо разработать алгоритмы управления, реализующие максимальный потенциал, заложенный в схемотехническое решение и физическую часть квантового дискриминатора частоты, что требует дополнительных исследований по влиянию алгоритмов управления КСЧ КПН на его метрологические характеристики. Для этого необходимо провести эксперименты по измерению влияния шумов составных частей при различных режимах работы КСЧ КПН.

Цель работы – показать необходимость исследований методов и алгоритмов управления в КСЧ КПН.

Метод. Для исследования влияния режимов работы составных частей КСЧ КПН на действительное значение и нестабильность частоты КСЧ КПН собрана экспериментальная установка. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Исследуемые составные части КСЧ КПН: ячейка, заполненная щелочным металлом; поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором; катушки подмагничивания; СВЧ-генератор с номинальной частотой 3,417 ГГц.

В данной установке частота выходного сигнала КСЧ КПН 10 МГц сравнивается с опорной частотой водородного стандарта частоты Ч1-1006 с помощью компаратора Ч7-315. Данные с компаратора поступают на персональный компьютер и записываются в файл в соответствии со значениями исследуемых параметров КСЧ КПН, такими как абсолютное значение температуры ячейки с парами щелочного металла и буферными газами, ток инжекции лазера, выходная мощность и девиация частоты СВЧ-генератора.

Результаты. Результаты исследования зависимости абсолютной температуры ячейки показывают, что существует оптимальная температура, для которой характерно минимальное влияние на действительное значение частоты [5]. В работе [6] показано, что данная зависимость сдвига частоты от температуры ячейки, заполненной двухкомпонентным газом и содержащей щелочной метал, имеет следующий вид:

$$\Delta f(T) = P_0 \left[\frac{\gamma_1 + r\gamma_2}{1+r} (T - T_0)^2 + \frac{\delta_1 + r\delta_2}{1+r} (T - T_0) + \frac{\beta_1 + r\beta_2}{1+r} \right],$$

где β_i – коэффициент, отвечающий за сдвиг частоты в зависимости от парциального давления i -го компонента буферного газа; δ_i, γ_i – коэффициенты, отвечающие за сдвиг частоты в зависимости от температуры i -го компонента буферного газа (соответственно линейный и квадратичный); P_0 – полное давление буферного газа при нормальных условиях; r – отношение давлений газов (P_2/P_1) при нормальных условиях; T_0 – температура при нормальных условиях.

Измеренный в данной работе сдвиг действительного значения частоты в зависимости от абсолютного значения температуры ячейки представлен на рис. 2. Оптимальная температура ячейки составила 68,3 °С.

Исследования влияния выходной мощности СВЧ-генератора на сдвиг действительного значения частоты КСЧ КПН показали, что критерий максимального контраста КПН-резонанса не всегда является лучшим выбором. Так, при увеличении уровня СВЧ-сигнала вырастает индекс модуляции, что приводит к падению интенсивности спектральных составляющих, формирующих КПН-резонанс. Тем не менее, отношение сигнал-шум изменяется не столь значительно, что приводит к малому различию девиации Аллана в интервалах измерений 1 с. В то же время наблюдается существенный выигрыш в долговременной стабильности из-за малой чувствительности сдвига частоты КПН-резонанса от вариаций мощности СВЧ-генератора и оптической мощности лазера. С учётом этого был изменён метод настройки рабочих параметров КСЧ КПН с метода максимального контраста КПН-резонанса на метод, основанный на измерении зависимости сдвига действительного значения частоты КСЧ КПН. В таблице представлены соответствующие значения относительного смещения частоты при настройке рабочих параметров.

Одним из наиболее значимых факторов, оказывающим влияние на нестабильность частоты, является точность настройки длины волны лазера на переход линии D_1 . Существует два

Относительное смещение $\Delta f_1, \Delta f_2$ частоты КПН-резонанса соответственно до и после исследований в зависимости от параметров работы КСЧ

Параметр	Значение параметра	$\Delta f_1 \cdot 10^{11}$	$\Delta f_2 \cdot 10^{13}$
Температура ячейки	0,05 К	2,1	2,4
Ток инжекции лазера	10 мкА	8,5	8,1
Мощность СВЧ-генератора	0,1 дБм	3,4	4,5

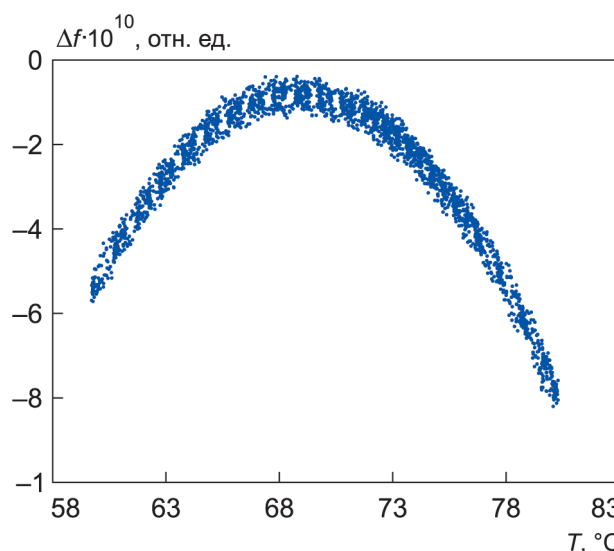


Рис. 2. Зависимость относительного сдвига частоты Δf КПН-резонанса от температуры T ячейки

Fig. 2. Dependence of the relative frequency shift Δf of the CPT resonance on the temperature T of the cell

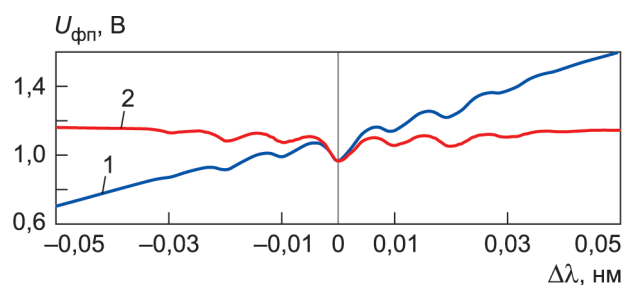


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала $U_{\text{фп}}$ фотоприёмника вблизи спектра поглощения от длины волны $\Delta\lambda$ лазера:

1 – метод изменения тока лазера, $U_{\text{фп}} = 9,0\Delta\lambda + 1,15$; 2 – метод изменения температуры, $U_{\text{фп}} = 0,165\Delta\lambda + 1,15$

Fig. 3. Dependence of the $U_{\text{фп}}$ output signal of the photodetector near the absorption spectrum on the laser wavelength $\Delta\lambda$:

1 – method for changing the laser current, $U_{\text{фп}} = 9,0\Delta\lambda + 1,15$; 2 – method for changing the temperature, $U_{\text{фп}} = 0,165\Delta\lambda + 1,15$

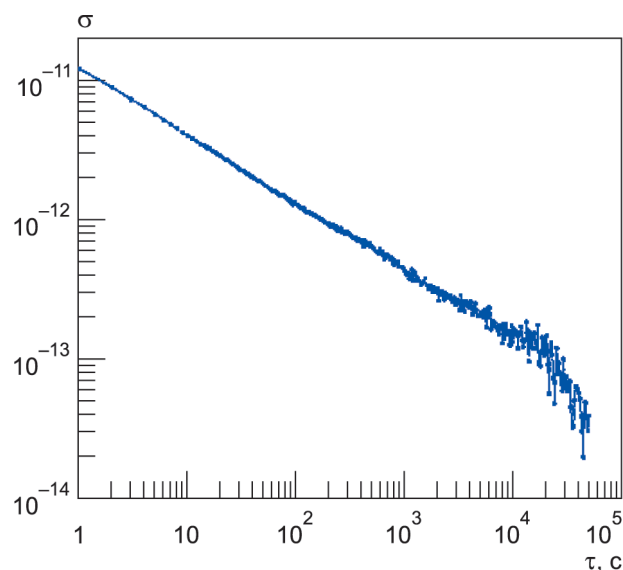


Рис. 4. Нестабильность частоты σ КСЧ КПН, выраженная в СКДО, обеспеченная с помощью разработанных алгоритмов управления; τ – интервал времени усреднения

Fig. 4. Instability of the frequency of the QSF CPT, expressed in AVAR, provided by the developed control algorithms; τ – averaging time interval

метода перестройки длины волны поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором.

Первый метод подразумевает изменение длины волны лазера посредством изменения тока инжекции лазера. Второй метод обеспечивает регулировку длины волны посредством изменения температуры лазера. Тщательное исследование этих методов позволило выделить их преимущества и недостатки. Основное преимущество первого метода – относительное быстродействие перестройки длины волны (характерные времена 10 нс), недостаток – появление дополнительного изменения интенсивности излучения к изменению длины волны.

Второй метод (изменение температуры лазера) также даёт изменение интенсивности излучения, однако это изменение более чем на порядок меньше, чем при изменении тока инжекции лазера. Дополнительным преимуществом второго метода является возможность установки заданной интенсивности излучения лазера с помощью изменения тока инжекции лазера. Однако этот метод обладает относительно низким быстродействием перестройки длины волны (характерные времена 10 мс).

Проведённые исследования позволили разработать алгоритм стабилизации длины волны лазера с учётом особенностей изменения длины волны лазера при изменении тока инжекции или температуры. Разработанный алгоритм учитывает асимметрию оптического спектра лазера, вызванную паразитной амплитудной модуляцией интенсивности излучения лазера при пробной модуляции током лазера. На рис. 3 представлено сравнение зависимостей изменения сигнала на фотоприёмнике вблизи спектра поглощения от длины волны лазера для различных методов изменения длины волны лазера: *кривая 1* представляет метод изменения тока инжекции лазера, а *кривая 2* – метод изменения его температуры.

С учётом вышесказанного разработаны алгоритмы, позволяющие обеспечить нестабильность частоты, представленную на рис. 4.

Анализ результатов. Полученные метрологические характеристики для КСЧ КПН в сравнении с результатами других авторов [7–10] являются передовыми. Но так же стоит отметить, что в работах, посвящённых промышленно выпускаемым КСЧ КПН, не приведены алгоритмы и методы управления КСЧ КПН, позволившие обеспечить авторам [7–10] заявленные метрологические характеристики. Например, такие технические тонкости, как метод перестройки длины волны лазера, учёт асимметрии оптического спектра лазера, критерий настройки мощности СВЧ-генератора или способ контроля интенсивности излучения лазера определяют итоговые метрологические характеристики. Так, отсутствие в литературе описания алгоритмов управления КСЧ КПН и методов его настройки других авторов не позволяет провести сравнительный анализ разработанных алгоритмов и выработать рекомендации к дальнейшему улучшению алгоритмов управления КСЧ КПН.

Заключение. Программное обеспечение в КСЧ КПН может качественно изменить их метрологические характеристики. В этом случае можно избежать значительного дрейфа действительного значения частоты КСЧ посредством усложнения алгоритмов управления его составными частями. В то время как отсутствие качественного анализа влияния алгоритмов управления в КСЧ КПН создаёт дополнительные трудности при разработке квантового стандарта частоты на основе эффекта корректного пленения населённости.

Список литературы

1. Svenja Knappe, Robert Wynands, John Kitching, Hugh G. Robinson, and Leo Hollberg, *Journal of the Optical Society of America B*, 2001, vol. 18, no. 11, pp. 1545–1553. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.18.001545>

2. Arimondo E., *Progress in Optic*, 1996, vol. 35, pp. 257–354. [https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(08\)70531-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70531-6)
3. Stähler M., Wynands R., Knappe S., Kitching J., Hollberg L., Taichenachev A., Yudin V., *Optics Letters*, 2002, vol. 27, pp. 1472–1474. <https://doi.org/10.1364/OL.27.001472>
4. Affolderbach C., Droz F., Mileti G., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, vol. 55, no. 2, pp. 429–435. <https://doi.org/10.1109/TIM.2006.870331>
5. Kozlova O., Danet J., Guérandel S., E. de Clercq, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, vol. 63, no. 7, pp. 1863–1870. <https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2298672>
6. Vanier J., Kunski R., Cyr N., Savard J., Tetu M., *Journal of Applied Physics*, 1982, vol. 53, no. 8, pp. 5387–5391. <https://doi.org/10.1063/1.331467>
7. Krzewick W., Mitchell J., Bollettiero J., Cash P., Wellwood K., Kosvin I., Zanca L., *Proceedings of the 2020 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, California, January 2020, pp. 1070–1083. <https://doi.org/10.33012/2020.17198>
8. Lutwak R., Vlitass P., Varghese M., Mescher M., Serkland D. K., Peake G. M., *Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*, 2005., Vancouver, BC, 2005, p. 6. <https://doi.org/10.1109/FREQ.2005.1574029>
9. Knappe S., Gerginov V., Schwindt P. D. D., Shah V., Robinson H. G., Hollberg L., and Kitching J., *Optics Letters*, 2005, vol. 30, no. 18, pp. 2351–2353. <https://doi.org/10.1364/OL.30.002351>
10. Zhao J., Liu R., Meng H., Hu E., He C., Wang Z., *Progress towards chip-scale atomic clock in Peking University, 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS)*, 2017, Besancon, pp. 611–613. <https://doi.org/10.1109/FCS.2017.8088973>

References

1. Svenja Knappe, Robert Wynands, John Kitching, Hugh G. Robinson, and Leo Hollberg, *Journal of the Optical Society of*

America B, 2001, vol. 18, no. 11, pp. 1545–1553. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.18.001545>

2. Arimondo E., *Progress in Optic*, 1996, vol. 35, pp. 257–354. [https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(08\)70531-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70531-6)
3. Stähler M., Wynands R., Knappe S., Kitching J., Hollberg L., Taichenachev A., Yudin V., *Optics Letters*, 2002, vol. 27, pp. 1472–1474. <https://doi.org/10.1364/OL.27.001472>
4. Affolderbach C., Droz F., Mileti G., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, vol. 55, no. 2, pp. 429–435. <https://doi.org/10.1109/TIM.2006.870331>
5. Kozlova O., Danet J., Guérandel S., E. de Clercq, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, vol. 63, no. 7, pp. 1863–1870. <https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2298672>
6. Vanier J., Kunski R., Cyr N., Savard J., Tetu M., *Journal of Applied Physics*, 1982, vol. 53, no. 8, pp. 5387–5391. <https://doi.org/10.1063/1.331467>
7. Krzewick W., Mitchell J., Bollettiero J., Cash P., Wellwood K., Kosvin I., Zanca L., *Proceedings of the 2020 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, California, January 2020, pp. 1070–1083. <https://doi.org/10.33012/2020.17198>
8. Lutwak R., Vlitass P., Varghese M., Mescher M., Serkland D. K., Peake G. M., *Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*, 2005., Vancouver, BC, 2005, p. 6. <https://doi.org/10.1109/FREQ.2005.1574029>
9. Knappe S., Gerginov V., Schwindt P. D. D., Shah V., Robinson H. G., Hollberg L., and Kitching J., *Optics Letters*, 2005, vol. 30, no. 18, pp. 2351–2353. <https://doi.org/10.1364/OL.30.002351>
10. Zhao J., Liu R., Meng H., Hu E., He C., Wang Z., *Progress towards chip-scale atomic clock in Peking University, 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS)*, 2017, Besancon, pp. 611–613. <https://doi.org/10.1109/FCS.2017.8088973>

Статья поступила в редакцию 02.07.2020;
принята к публикации 02.08.2020.