

# МНОГОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМАХ ГЕОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МАРКШЕЙДЕРСКО-ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

М. Г. Гуров<sup>1</sup>, Е. Г. Гурова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Менделеево пгт, Менделеево, Московская обл., 141570, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

**Аннотация:** В статье рассмотрены особенности модернизации устройства частотно-го репера, потенциально пригодного для нанесения проектной разбивки и слежения за положением техники при горно-ландшафтной разметке горных и карьерных разработок. Описана связь реперов частоты с глобальными системами позиционирования. Приведены возможности работы новых систем в совокупности с применением со спутниковыми системами геопозиционирования, слежения за положением и движением горнодобывающих средств. Представлены основные принципы функционирования источника опорной оптической частоты схемы оптического репера частоты. Описывается созданная система обратной связи, потенциально применимая в приёмниках обработки сигналов. Особенностью данной системы является наличие оптического селективирующего элемента, позволяющего обеспечить одновременную стабилизацию нескольких источников лазерного излучения по одному высокодобротному оптическому резонатору, что, в свою очередь, позволяет уменьшить массогабаритные характеристики оконечных устройств, а также упрощает настройку данных устройств в полевых условиях. Предложена новая схема восстановления цепей обратной связи, схема доработки этой цепи, позволяющая продлённое или потенциально бесконечное, относительно сигналов коррекции, функционирование. Проведено сравнение оптических источников репера частоты с различными массогабаритными характеристиками. Проведён анализ полученных оптических биений между большими системами и предлагаемой компактной многоканальной системой.

**Ключевые слова:** разметка местности, топографирование, геопозиционирование, горный ландшафт, частотный репер, спутниковая геодезия, планировка поверхности, управление транспортом, спутниковая геодезия, дальнометрия.

**Для цитирования:** Гуров М. Г., Гурова Е. Г. Многоканальная система стабилизации частоты оптического излучения в системах геопозиционирования маркшейдерско-геодезического оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 280–291. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_101\_0\_280.

---

# Multi-channel optical radiation frequency stabilization system in geopositioning systems of mine surveying and geodetic equipment

M. G. Gurov<sup>1</sup>, E. G. Gurova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> FSUE «Russian metrological Institute of Technical Physics and Radio engineering», Mendeleevo, Moscow reg., 141570, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marks av., Novosibirsk, 630073, Russia

---

**Abstract:** In this paper the features of the modernization of the frequency reference device, potentially suitable for applying the design breakdown and tracking the position of equipment during mountain and landscape marking of mining and quarry developments have been discussed. The possibilities of operation of new systems in conjunction with the use of satellite geopositioning systems, tracking the position and movement of mining facilities are presented. The basic principles of the operation of the reference optical frequency source of the optical frequency reference scheme are presented also. The created feedback system, potentially applicable in signal processing receivers, is described. The feature of this system is the presence of an optical selective element, which makes it possible to simultaneously stabilize several sources of laser radiation through one high-Q optical cavity, which, in turn, makes it possible to reduce the weight and size of the terminal devices, and also simplifies the adjustment of these devices in the field. The new circuit for feedback auto-recovery system is proposed. Due to this property the system allows extended or potentially infinite, relative to correction signals, operation. The comparison of optical sources of the frequency reference with different weight and size characteristics is made. The obtained optical beats between large systems and the proposed compact multichannel system have been analyzed also.

**Key words:** terrain marking, topography, geopositioning, mountain landscape, frequency reference, satellite geodesy.

**For citation:** Gurov M. G., Gurova E. G. Multi-channel optical radiation frequency stabilization system in geopositioning systems of mine surveying and geodetic equipment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):280–291. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_101\_0\_280.

---

## 1. Введение

Использование спутниковых глобальных геодезических систем вошли в практику применения в маркшейдерско-геодезических изысканиях [1, 2]. Их применение позволяет повысить точность составления карт и координат положения устройств и техники, применяемой, например, в карьерных разработках. С использованием специального программного обеспечения, а также систем спутникового позиционирования [3], которое позволяет с высокой точностью прокладывать топографические карты и схемы путей тяжёлой техники горных предприятий, появилась возможность слежения

за данными процессами в реальном масштабе времени [4–8]. Операторы оборудования могут в реальном времени следить за топографической ситуацией, обновлять информацию о положении дорожного полотна и тяжёлой техники, корректировать движение самосвалов, экскаваторов и т.п.

Данные нововведения зависят не только от спутниковой системы геопозиционирования и программного обеспечения, но и, в должной мере, от устройств, размещаемых на технике, т.е. приёмников, обрабатывающих сигналы от передатчиков на спутниках ГЛОНАСС, GPS, Beidou, Galileo

[5 — 8]. Данные приёмники позволяют принимать сигналы со спутников и рассчитывать свои пространственные координаты. Спутники в данном случае являются устройствами с известными координатами. Расстояния между спутником и приёмником определяется через время распространения радиосигнала от спутника до приёмника. Получив такую информацию от минимум четырёх спутников, определяют пространственно-временные координаты приёмника. Данный подход требует наличия на передатчике спутника и приёмнике, находящемся у поверхности Земли, устройств, реперов частоты, таких как водородные генераторы, миниатюрные устройства на основе резонанса когерентного пленения населённости (КПН) или, в достаточной степени, миниатюризированные генераторы частоты на основе запрещённых оптических переходов или оптические стандарты частоты (ОСЧ) [9]. Точность частоты репера напрямую определяет возможность построения точной карты расположения этих устройств. Но, ввиду технологической сложности и стоимости, достаточно сложно разместить на каждой единице техники водородный генератор или обычные, не миниатюризированные ОСЧ.

Наиболее распространёнными среди атомных стандартов частоты являются ОСЧ, работающие на атомных переходах в ультравысоком и сверхвысоком диапазонах частот. ОСЧ в настоящее время демонстрируют метрологические характеристики, превосходящие стандарты частоты СВЧ-диапазона в несколько раз [10, 11].

Поэтому в настоящее время предпринимаются попытки уменьшить массогабаритные характеристики ОСЧ с целью их размещения на спутниках глобальных систем позицио-

нирования и наземных приёмниках. Технические особенности ОСЧ подразумевают наличие в их составе нескольких систем обратных связей с использованием достаточно больших и имеющих большую массу вакуумированных оптических резонаторов для разных, зачастую очень близких, длин волн, соответствующих рабочим атомным переходам, используемым для получения стабильного частотного сигнала [12].

Существует несколько способов связи физической части и системы, являющейся источником излучения: синхронное детектирование [11], системы компенсации шумов в оптоволоконных линиях [12–14], стабилизация по модуляционному боковым составляющим оптической несущей или метод Паунда–Древера–Холла (ПДХ) [15], метод поддержания состояния поляризации — метод Хэнша–Койо (ХК) [16, 17].

Для уменьшения габаритов, упрощения схемотехники, оптимизации количества дорогостоящих элементов целесообразно использовать принцип объединения, который позволяет реализацию нескольких узкополосных лазерных систем с использованием одного оптического интерферометра (резонатора). В данной статье описывается вариант реализации объединения систем стабилизации сканирующего излучения хранителя оптической несущей («часовое» излучение) и вторичного охлаждения на примере ОСЧ на изотопе стронция-87. Также приводится описание нового подхода к созданию многоканальных систем обратной связи на основе метода ПДХ с коррекцией рабочей моды резонатора для удовлетворения требования продолжительной бесперебойной работы системы и выбора рабочей моды стабилизации.

## 2. Принцип работы многоканальной системы стабилизации

Принцип действия системы стабилизации частоты оптического излучения по высокочастотному резонатору заключается в получении сигнала ошибки гомодинным способом из оптического излучения и выработке радиочастотного сигнала коррекции. В подобном типе обратной связи или системы ПДХ кроме источника стабилизируемого лазерного излучения используются электрооптический модулятор, смеситель, пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) фильтр, оптический узкополосный фильтр (например, высокочастотный резонатор) и высокочастотный лавинный фотоприемник, объединённые схемой, представленной на рис. 1. Для определения типа оптической моды с обратной стороны высокочастотного резонатора помещается миниатюрная видеокамера с дисплеем или «медленный» фотоприемник, отображающий характер оптической моды в резонаторе ТЕМ<sub>00</sub>, ТЕМ<sub>01</sub> и т.д.

Излучение лазера, проходя через электрооптический (фазовый) модулятор, приобретает дополнительные спектральные составляющие, отстоящие от оптической несущей на величину частоты опорного генератора. Беспрепятственно проходя через поляризационный куб, излучение, в спектре которого присутствуют дополнительные боковые составляющие, частично проходит в резонатор. Высокочастотный резонатор частично или полностью отфильтровывает боковые полосы оптической несущей. Проходя в обратном направлении, излучение направляется на лавинный фотоприемник для выделения в сочетании со смесителем и опорным генератором сигнала ошибки. Данный сигнал ошибки через

ПИД-регулятор поступает на органы управления источника лазерного излучения (пьезокерамику, токовый и/или температурный вход), что позволяет оперативно корректировать частоту оптического излучения.

Для уменьшения трудозатрат по настройке, а также массогабаритных характеристик лазерных систем можно использовать объединение систем стабилизации к одному высокочастотному резонатору (рис. 2). Многие ОСЧ имеют рабочие длины волн, достаточно близкие для осуществления данного метода. Например, в ОСЧ на основе изотопа стронция-87 «часовое» излучение имеет длину волны, которая находится в районе 698 нм, длина волны системы лазера вторичного охлаждения находится в районе 689 нм, длины волн лазеров перекачки — 679 и 707 нм, что в общем случае укладывается в ширину полосы отражения диэлектрических зеркал высокочастотного резонатора.

В различных системах для фильтрации излучения могут быть использованы различные фильтры, такие как фильтры поглощения, дихроичные фильтры. Но данные типы оптических элементов из-за своей структуры не позволяют получать полосы фильтрации оптического излучения уже 40–50 нм. Поэтому для построения систем с близко расположенными несущими длинами волн необходимо использовать интерференционные фильтры, оптические дисперсионные призмы или дифракционные решетки. Например, для случая ОСЧ на основе изотопа стронция-87, для совмещения систем хранителя оптической несущей сканирующего излучения («часового лазера») и лазера системы вторичного охлаждения необходимо использовать фильтр с рабочей полушириной не менее 0,2–0,3 нм и не более 9 нм.

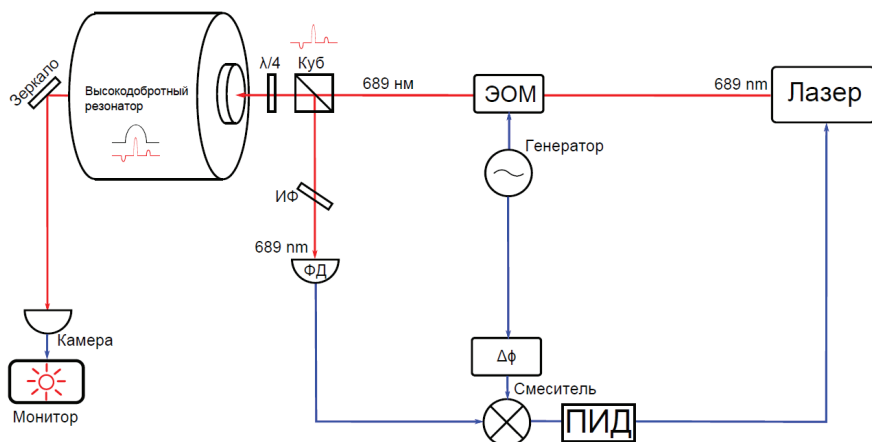


Рис. 1. Система Паунда–Древера–Холла в оригинальном исполнении  
 Fig. 1. Initial Pound–Drever–Hall feedback system

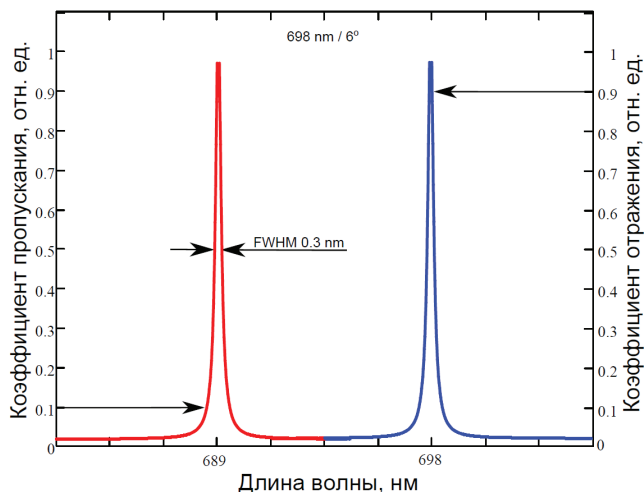


Рис. 2. Изображение спектральной зависимости коэффициентов пропускания и отражения селективирующего элемента – интерференционного фильтра  
 Fig. 2. The plot of the spectral dependence of the transmission and reflection coefficients of the interference filter

Устройство стабилизации излучений по высокодобротному резонатору образовано путем использования дополнительных многоканальных волоконных объединителей и оптических селективирующих дисперсионных высокопропускающих элементов, например, интерференционных фильтров и дифракционных решеток. Данная комбинация

элементов позволяет стабилизировать длины волн (частоты) нескольких лазерных источников (например, лазеров систем оптического хранителя и вторичного охлаждения) по одному высокостабильному резонатору модернизируемых систем без существенных конструктивных изменений схемы включения оптического интерферо-

метра (резонатора), уменьшить время и частоту настройки электроники, опто-электрических параметров и оптики.

В описываемой модернизированной системе стабилизации (рис. 3) [18] излучение от двух лазерных источников при помощи оптоволоконного объединителя направляется на вход регулярной одноканальной системы стабилизации. Проходя электрооптический модулятор, все объединённые длины волн приобретают боковые полосы и после прохождения поляризационного куба могут беспрепятственно быть разделены на составляющие при помощи интерференционного фильтра, оптической дисперсионной призмы или дифракционной решётки и далее направлены на соответствующие фотоприёмники соответствующих обратных связей источников лазерных излучений.

Таким образом, происходит стабилизация двух или более источников лазерного излучения из состава ОСЧ как источника стабильной частоты. При этом масса системы уменьшается на массу одного или более оптических резонаторов, что, в свою очередь, положительно сказывается на массогабаритных характеристиках источника частоты ОСЧ.

### **3. Система выбора рабочей моды резонатора**

Характерной особенностью сверхвысокодобротных резонаторов является «многомодовость», то есть наличие большого набора рабочих мод ТЕМ<sub>00</sub>, отстоящих по частоте на величину, определяемую длиной резонатора. Применение систем со стабилизацией частоты (длины волны) в ОСЧ сопряжено с выбором и удержанием строго определённой моды. Для данных целей используются схемы автовосстановления цепей обратных связей, замыкаю-

щие логическую последовательность удержания системы и автоматического поиска условий и диапазонов стабилизации [19, 20]. На рис. 4 приведена схема реализации одного из вариантов системы обратной связи с автовосстановлением. Абсолютное значение частоты данной моды определяется и удерживается при помощи измерителя длин волн с точностью 2 МГц, что является достаточным для целеуказания и захвата радиочастотной цепи обратной связи ПДХ. При помощи оптического разветвителя часть стабилизированного лазерного излучения подается на один из каналов измерителя длин волн. После анализа оптического излучения измеритель вырабатывает сигнал коррекции, который через сумматор подается в цепь коррекции параметров лазерного излучения лазера.

### **4. Характеризация многоканальной системы**

Несмотря на очевидную работоспособность реализованной многоканальной системы, возникает необходимость оценки её выходных характеристик. Поскольку система стабилизации частоты оптического излучения может быть охарактеризована в сравнении с другой аналогичной системой, для сравнения выбраны две системы с горизонтально ориентированным и вертикально ориентированным резонаторами, которые изготовлены специалистами ФГБУН ФИАН им. П. Н. Лебедева по заказу ФГУП ВНИИФТРИ. Типичные характерные размеры данных систем — 700×700×1000 мм при массе более 50 кг каждый. На рис. 5 представлен спектр оптических биений двух резонаторов, полученных при помощи спектроанализатора и лавинного фотоприемника. Видно, что ширина спектра биений ~2 кГц, при RBW:3,9 Гц, VBW:3,9 Гц.

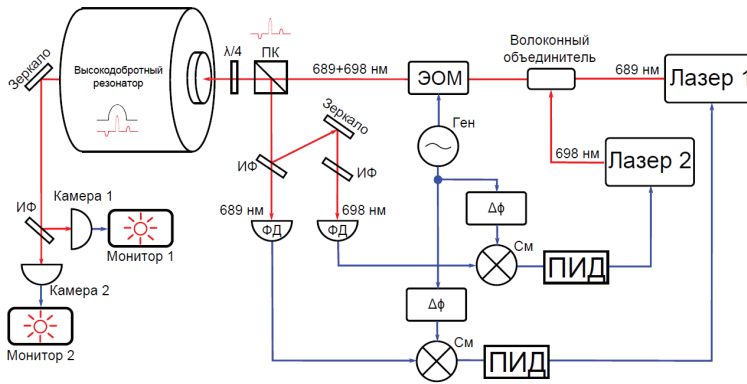


Рис. 3. Система Паунда–Древера–Холла в исполнении с интерференционным фильтром  
 Fig. 3. The Pound–Drever–Hall feedback system with included interference filter

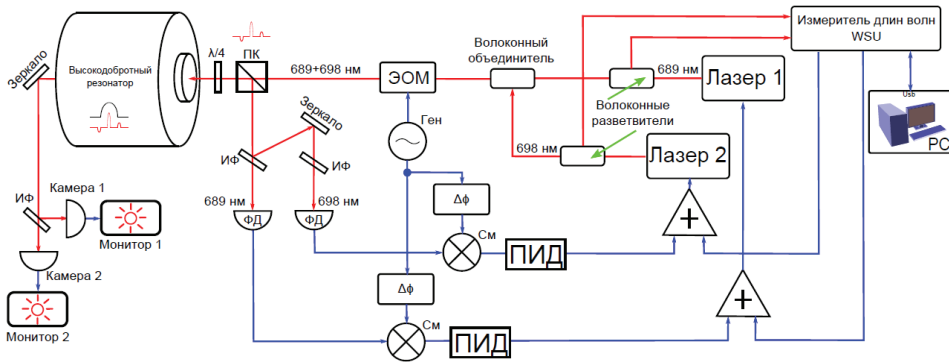


Рис. 4. Дополнительная система определения рабочей моды высокодобротного резонатора схемы Паунда–Древера–Холла  
 Fig. 4. The Pound–Drever–Hall feedback system with the additional system for determining the operating mode of a high-Q cavity

После устранения причин, вызывающих такое уширение спектра биений, то есть звуковое и вибрационное воздействие на резонаторы (временно устранено выключением вентиляции лаборатории), получен спектр биений двух систем, показанный на рис. 6, а. Спектр биений часовых лазеров после выключения вентиляции имел полуширину  $\sim 400$  Гц при ширине центрального пика биений по уровню 90%  $\sim 15$  Гц, а также неприемлемый для стабилизации хаотичный дрейф дан-

ного пика, а, следовательно, и выходной частоты.

При получении биений между системой с горизонтально ориентированным резонатором и новой многоканальной узкополосной системой на той же приборной базе также получены оптические биения. На рис. 6, б представлен спектр биений горизонтального резонатора и канала с «часовым» излучением (698 нм) новой многоканальной системы с полностью работающей вентиляцией. Спектр биений часовых лазе-



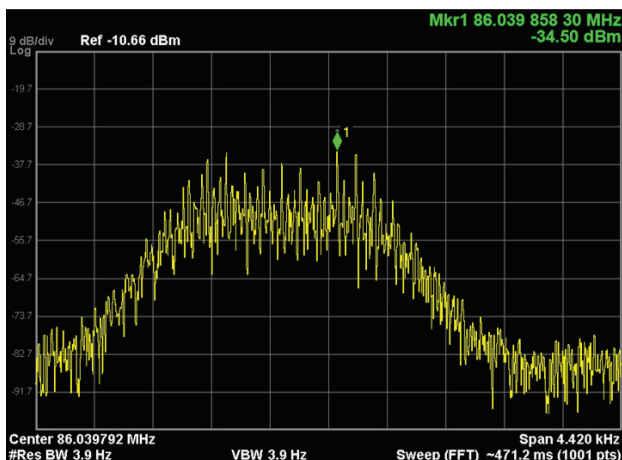
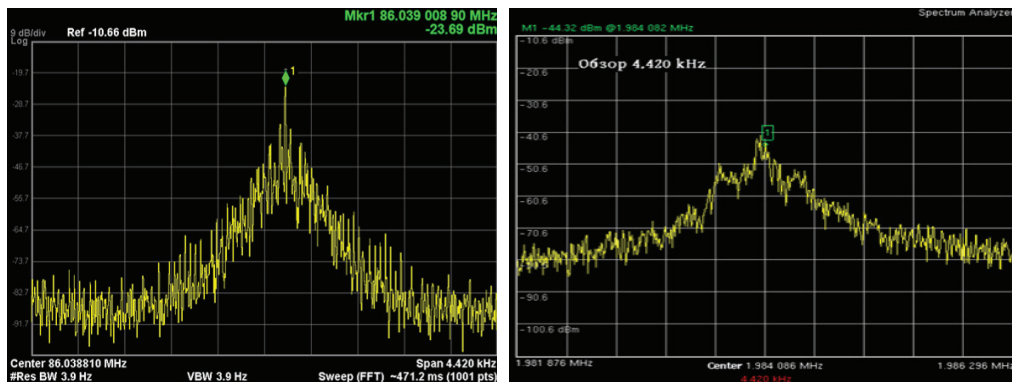


Рис. 5. Спектр биений оптических «часовых» систем (698 нм) с горизонтально ориентированным и вертикально ориентированным резонатором. Ширина спектра биений ~2 кГц; RBW:3,9 Гц; VBW:3,9 Гц; диапазон охвата 4,4 кГц

Fig. 5. The beatnotes spectrum between clock systems (698 nm) with the horizontal and the vertical oriented cavities. The width of the line ~2 kHz, RBW:3,9 Hz, VBW:3,9 Hz, the span of the spectrum analyzer is 4.4 kHz



а

б

Рис. 6. Спектры биений систем: а – с большими массогабаритными характеристиками; б – многоканальной системы и системы с горизонтально ориентированным резонатором, диапазон охвата шкалы прибора 4,4 кГц

Fig. 6. The beatnotes spectrum of the systems: а – between both large weight and size systems and б – the multichannel system and the system with a horizontally oriented cavity, the span of the spectrum analyzer is 4.4 kHz

ров: горизонтально ориентированного массой более 50 кг и малого вертикального длиной 10 см из (~10 см) и массой 16 кг без выключения вентиляции.

Видно, что спектр с работающей вентиляцией имеет практически такую же форму. То есть новая система

не вносит дополнительных возмущений и имеет аналогичные характеристики с большими системами.

## 5. Заключение

Потенциально достижимая точность в системах определения координат при



горно-ландшафтной разметке и на горных выработках формируется точностью воспроизведения частоты наземного приёмника и спутникового передатчика, так как расстояния до источников и до земной поверхности определяются через время распространения сигналов до измеряемых объектов [3]. Поэтому разработка и совершенствование источников опорной образцовой частоты является одной из приоритетных задач в области измерений времени и частоты геологических систем, устройств проектирования земной поверхности [4] и разработки перспективных методов изысканий в горном деле [5–8].

В рамках научного исследования разработана и реализована узкополосная многоканальная система стабилизации, позволяющая уменьшить массогабаритные характеристики источников частоты ОСЧ, с перспективой миниатюризации и использования в горном деле при горно-ландшафтной разметке и на горных и карьерных выработках, которые могут повысить точность составления карт и координат положе-

ния устройств и техники; приведены принципы функционирования оптического репера частоты на примере стронциевого разработаны оптические стандарты частоты нового поколения.

1. Обоснованы предпосылки использования модифицированных и миниатюризированных источников частоты на основе атомных переходов для использования в горно-ландшафтной разметке и наблюдения в режиме реального времени за положением карьерной техники.

2. Описаны принципы построения многоканальной системы для уменьшения массо-габаритных характеристик источников частоты для передатчиков и приемников систем геопозиционирования.

3. Получены положительные результаты после анализа сравнительных характеристик новой системы с характеристиками крупногабаритных стационарных систем стабилизации.

4. По тематике исследований получены два патента на изобретения РФ: № 2752462 (28.07.2021) и № 2786601 (29.06.2022).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bondarescu R., Schärer A., Lundgren A., Hetényi G., Houlié N., Jetzer P., Bondarescu M.* Ground-based optical atomic clocks as a tool to monitor vertical surface motion // *Geophys. J. Int.* 2015, vol. 202, pp. 1770–1774. DOI: 10.1093/gji/ggv246.

2. *Thompson A., Moran J., Swenson G.* Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. Springer, Cham. 2017, p. 872. DOI: 10.1007/978-3-319-44431-4.

3. *Fujieda M., Piester D., Gotoh T., Becker J., Aida M., Bauch A.* Carrier-phase two-way satellite frequency transfer over a very long baseline // *Metrologia.* 2014, vol. 51, pp. 253–262. DOI:10.1088/0026-1394/51/3/253.

4. *Аленичев В. М.* Формирование геоинформации для диагностики состояния горного предприятия // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2021. — № 5–1. — С. 217–225. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_51\_0\_217.

5. *Воротынцева И. А., Смирнов П. А., Данильченко А. Л., Якубов М. М.* Интерпретация геологических данных на стадии геологоразведочных работ золоторудного месторождения // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2021. — № 11. — С. 45–55. DOI: 10.25018/0236/1493/2021/11/0\_45.

6. *Антонов В. А., Аленичев В. М.* О мониторинге геоданных и моделировании продуктивного пласта россыпного месторождения золота // *Маркшейдерия и недропользование.* — 2018. — № 3(95). — С. 56–59.

7. Аленичев В. М. Формирование геоинформации для диагностики состояния горного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5–1. — С. 217–225. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_51\_0\_217.

8. Наговицын О. В. Лукичев С. В. Современное состояние и перспективы развития горно-геологических систем // ГИАБ. — 2017. — № 23. — С. 53–67.

9. Tanaka Y. and Katori H. Exploring potential applications of optical lattice clocks in a plate subduction zone // Journal of Geodesy. 2021, vol. 95. pp. 93.

10. Takamoto M., Ushijima I., Ohmae N., Yahagi T., Kokado K., Shinkai H., and Katori H. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks // Nat. Photon. 2020, vol. 14, pp. 411–415. DOI:10.1038/s41566-020-0619-8.

11. McGrew W. F., Zhang X., Fasano R. J., Schäffer S. A., Beloy K., Nicolodi D., Brown R. C., Hinkley N., Milani G., Schioppo M., Yoon T. H., Ludlow A. D. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level // Nature. 2018, vol. 564, pp. 87–90. DOI: 10.1038/s41586-018-0738-2.

12. Lodewyck J., Zawada M., Lorini L., Gurov M., Lemonde P. Observation and cancellation of a perturbing dc stark shift in strontium optical lattice clocks // Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions. 2012, vol. 59, no. 3, pp. 411–415.

13. Horowitz P. and Hill W. The Art of Electronics. Moscow, Binom, 2020, 704 p.

14. Ma L.-Sh., Jungner P., Ye J., and Hall J. L., Delivering the same optical frequency at two places: accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other time-varying path // Optics letters. 1994, vol. 19, no. 21, pp. 1777–1779.

15. Drever R. W. P., Hall J. L., Kowalski F. V., et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator // Appl. Phys. B. 1983, vol. 31, pp. 97–105.

16. Hänsch T. W. and Couillaud B. Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity // Optics Communications. 1980, vol. 35, issue 3, pp. 441–444.

17. Gurov M. G., Gurova E. G. Toward the issue of feedback systems of frequency standards // The 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST — 2016). 2016, vol. 1, pp. 82–85. DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884342.

18. Патент РФ № 2786601, 29.06.2022. Гуров М. Г. Многоканальная система стабилизации частоты оптического излучения. 2022. — Бюл. № 36.

19. Haze Sh., Hata S., Fujinaga M., and Mukaiyama T. Note: Auto-relock system for a bow-tie cavity for second harmonic generation // Review of scientific instruments. 2013, vol. 84, p. 026111.

20. Патент РФ № 2752462, 28.07.2021. Гуров М. Г. Замедлитель Зеемана атомного пучка. 2021. — Бюл. № 22. **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Bondarescu R., Schärer A., Lundgren A., Hetényi G., Houlié N., Jetzer P., Bondarescu M. Ground-based optical atomic clocks as a tool to monitor vertical surface motion. *Geophys. J. Int.* 2015, vol. 202, pp. 1770–1774. DOI: 10.1093/gji/ggv246.

2. Thompson A., Moran J., Swenson G. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. Springer, Cham. 2017, p. 872. DOI: 10.1007/978-3-319-44431-4.

3. Fujieda M., Piester D., Gotoh T., Becker J., Aida M., Bauch A. Carrier-phase two-way satellite frequency transfer over a very long baseline. *Metrologia*. 2014, vol. 51, pp. 253–262. DOI:10.1088/0026-1394/51/3/253.

4. Alenichev V. M. Formation of geoinformation for diagnosing the state of a mining enterprise. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5–1, pp. 217–225. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_51\_0\_217.

5. Vorotyntseva I. A., Smirnov P. A., Danilchenko A. L., Yakubov M. M. Interpretation of geological data at the stage of geological exploration of a gold deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11, pp. 45–55. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_45.

6. Antonov V. A., Alenichev V. M. About GEODATA monitoring and modeling of a productive layer of a gold-bearing placer. *Markshejderiya i nedropol'zovanie.* 2018, no. 3, pp. 56–59. [In Russ].

7. Voronov G. A. Comparison and analysis of the results of the postprocessing of satellite observation data using GLONASS and GPS navigation systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 9–1, pp. 111–117. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-111-117.

8. Nagovicyn O. V. Lukichev S. V. Modern state and prospects of development of mining and geological systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 23, pp. 53–67. [In Russ].

9. Tanaka Y. and Katori H. Exploring potential applications of optical lattice clocks in a plate subduction zone. *Journal of Geodesy.* 2021, vol. 95, pp. 93.

10. Takamoto M., Ushijima I., Ohmae N., Yahagi T., Kokado K., Shinkai H., and Katori H. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks. *Nat. Photon.* 2020, vol. 14, pp. 411–415. DOI:10.1038/s41566-020-0619-8.

11. McGrew W. F., Zhang X., Fasano R. J., Schäffer S. A., Beloy K., Nicolodi D., Brown R. C., Hinkley N., Milani G., Schioppo M., Yoon T. H., Ludlow A. D. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level. *Nature.* 2018, vol. 564, pp. 87–90. DOI: 10.1038/s41586-018-0738-2.

12. Lodewyck J., Zawada M., Lorini L., Gurov M., Lemonde pp. Observation and cancellation of a perturbing dc stark shift in strontium optical lattice clocks. *Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions.* 2012, vol. 59, no. 3, pp. 411–415.

13. Horowitz pp. and Hill W. The Art of Electronics. Moscow, Binom, 2020, 704 p.

14. Ma L.-Sh., Jungner P., Ye J., and Hall J. L., Delivering the same optical frequency at two places: accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other time-varying path. *Optics letters.* 1994, vol. 19, no. 21, pp. 1777–1779.

15. Drever R. W. P., Hall J. L., Kowalski F. V., et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator. *Appl. Phys. B.* 1983, vol. 31, pp. 97–105.

16. Hänsch T. W. and Couillaud B. Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity. *Optics Communications.* 1980, vol. 35, Issue 3, pp. 441–444.

17. Gurov M. G., Gurova E. G. Toward the issue of feedback systems of frequency standards. The 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2016). 2016, vol. 1, pp. 82–85. DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884342.

18. Patent RU no. 2786601, 29.06.2022. Gurov M. G. Multi-channel optical radiation frequency stabilization system. 2022. Bull. no. 36. [In Russ].

19. Haze Sh., Hata S., Fujinaga M., and Mukaiyama T. Note: Auto-relock system for a bow-tie cavity for second harmonic generation. *Review of scientific instruments.* 2013, vol. 84, p. 026111.

20. Patent RU no. 2752462, 28.07.2021. Gurov M. G. Zeeman slower. 2022. Bull. no. 36. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Гуров Михаил Геннадьевич*<sup>1</sup> — научный сотрудник,  
e-mail: goorovmg@mail.ru;

*Гурова Елена Геннадьевна*<sup>2</sup> — доцент,  
e-mail: lena319@mail.ru,

<sup>1</sup> ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Менделеево пгт, Менделеево, Московская обл., 141570, Россия;

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Gurov M. G.*<sup>1</sup>, Researcher,  
e-mail: goorovmg@mail.ru;

*Gurova E. G.*<sup>2</sup>, associate professor,  
e-mail: lena319@mail.ru;

<sup>1</sup> Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering Measurements”, Mendeleevo village, Mendeleevo, Moscow region, 141570, Russia;

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073 Russia.

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 24.07.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 24.07.2023; accepted for printing 10.10.2023.

