

Приборы и техника физического эксперимента

Научная статья

УДК 53.098

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18204>

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ В РУБИДИЕВЫХ АТОМНЫХ ЧАСАХ

С. В. Ермак , В. В. Семенов, М. В. Сергеева

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

 serge_ermak@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований зависимости продольного коэффициента экранирования магнитного экрана (в направлении оси экрана) малогабаритных рубидиевых атомных часов (РАЧ) от напряженностей и взаимной ориентации их внутреннего рабочего и дополнительного внешнего магнитных полей. При этом дополнительное поле намагничивает извне магнитный экран РАЧ и проникает внутрь него. Установлено существенное влияние этих полей в их взаимосвязи на экранирующие свойства магнитного экрана РАЧ. Полученные результаты позволяют определять продольный коэффициент экранирования РАЧ при действующих значениях рабочего и дополнительного магнитных полей и, как следствие, компенсировать влияние вариаций геомагнитного поля на частоту бортовых РАЧ.

Ключевые слова: рубидиевые атомные часы, магнитное поле, магнитный экран, продольный коэффициент экранирования

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 20-19-00146, <https://rscf.ru/project/20-19-00146/>.

Для цитирования: Ермак С. В., Семенов В. В., Сергеева М. В. Влияние магнитного поля на эффективность магнитного экранирования в рубидиевых атомных часах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 2. С. 41–48. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18204>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18204>

THE EFFECT OF THE MAGNETIC FIELD ON THE SHIELDING EFFICIENCY IN A RUBIDIUM ATOMIC CLOCK

S. V. Ermak , V. V. Semenov, M. V. Sergeeva

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 serge_ermak@mail.ru

Abstract. The paper presents the experimental study results of the dependence of the longitudinal shielding coefficient of a magnetic shield (in the direction of the shield axis) on the strengths and mutual orientation of the operational internal and additional external magnetic fields of a small-sized rubidium atomic clock (RAC). In this case, an additional field magnetizes the RAC's magnetic shield from the outside and penetrates inside it. The significant influence of these fields in their interrelation on the shielding properties of the magnetic shield of the RAC has been found. The obtained results allowed us to determine the longitudinal RAC-shielding coefficient at the effective values of the operational and additional magnetic fields and, as a consequence, to compensate for the effect of geomagnetic field variations on the frequency of the onboard RAC.

Keywords: rubidium atomic clock, magnetic field, magnetic screen, longitudinal shielding coefficient

Funding: The reported study was funded by Russian Science Foundation (Grant No. 20-19-00146), <https://rscf.ru/project/20-19-00146/>.

For citation: Ermak S. V., Semenov V. V., Sergeeva M. V., The effect of the magnetic field on the shielding efficiency in a rubidium atomic clock, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (2) (2025) 41–48. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18204>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

В настоящее время с помощью околоземных спутниковых систем решаются важнейшие задачи навигации. Точность таких систем в значительной степени зависит от характеристик бортовых атомных часов [1 – 3], в качестве которых для мини- и наноспутников можно использовать малогабаритные рубидиевые атомные часы (РАЧ) [4]. Магнитный экран последних ослабляет влияние вариаций внешнего магнитного поля (геомагнитного) на частоту РАЧ. Однако вследствие неизбежных дефектов (например, швы и коммуникационные отверстия) такие экраны не позволяют полностью исключить влияние вариаций указанного поля на стабильность частоты РАЧ [5]. Эти неоднородности конструкции экрана приводят к резкому различию поперечного и продольного (вдоль оси экрана) коэффициентов экранирования [6]. Подобное различие коэффициентов экранирования приводит к изменению величины и направления магнитного поля, проникающего в магнитный экран при расположении РАЧ, например, на борту спутника [7], движущегося по околоземной орбите и приводящего к возникновению ориентационной зависимости частоты бортовых РАЧ. Для ослабления такой зависимости обычно прибегают к применению многослойных магнитных экранов, обеспечивающих достаточно высокую стабильность частоты РАЧ. Так например, использование пятислойного магнитного экрана в бортовом варианте атомно-лучевых цезиевых часов с лазерной накачкой, описанного в статье [8], позволило получить долговременную относительную нестабильность частоты на уровне $3,5 \cdot 10^{-15}$ при значении кратковременной относительной нестабильности 10^{-13} . При этом экспериментальное значение коэффициента экранирования составляло $3 \cdot 10^5$ в магнитном поле с напряженностью, равной ± 24 А/м.

Негативным фактором использования многослойных магнитных экранов в бортовых РАЧ (особенно малогабаритных) является увеличение их суммарных габаритов и веса, что стимулирует поиск новых схемных решений, обеспечивающих требуемую стабильность частоты РАЧ. В нашей статье [9] было показано, что намагничивание двухслойного магнитного экрана РАЧ дополнительным постоянным внешним полем существенно повышает его коэффициент экранирования, что позволяет снизить влияние вариаций внешнего магнитного поля на стабильность частоты РАЧ. В частности, было обнаружено восьмикратное увеличение коэффициента экранирования для напряженности дополнительного постоянного намагничивающего поля примерно 12,8 А/м, направленного перпендикулярно оси РАЧ (направление наибольшего коэффициента экранирования магнитного экрана РАЧ), при амплитуде внешнего вращающегося магнитного поля около 2,5 А/м, имитирующего геомагнитное поле на орбите навигационного спутника.

Дальнейшие эксперименты показали, что при указанных значениях дополнительного намагничивающего и вращающегося магнитных полей коэффициент экранирования магнитного экрана РАЧ зависит как от величины, так и от ориентации рабочего магнитного поля H_{op} (внутреннее поле РАЧ), создаваемого в окрестности газовой ячейки магнитной системой РАЧ.

В настоящей работе анализируются детали указанной зависимости по результатам измерений сдвигов частоты РАЧ при встречной и соосной ориентациях внешнего



дополнительного постоянного магнитного поля $\mathbf{H}_0$ относительно рабочего магнитного поля $\mathbf{H}_{op}$.

Данное дополнительное поле $\mathbf{H}_0$ проникает извне внутрь экрана и ориентируется вдоль продольной оси этого экрана. При этом небольшое значение продольного (по сравнению с поперечным) коэффициента экранирования S характеризует степень проникновения поля $\mathbf{H}_0$ внутрь экрана и, как следствие, чувствительность частоты РАЧ к вариациям внешнего магнитного поля. Таким образом, измерения сдвигов частоты РАЧ позволяет извлекать информацию о значениях продольного коэффициента экранирования S .

Цель данного исследования состояла в поиске средств компенсации влияния внешнего магнитного поля на частоту рубидиевых атомных часов (РАЧ). Первоочередная задача, стоявшая в этом случае, — определить поведение ключевой величины — продольного коэффициента экранирования магнитного экрана РАЧ, значения которого можно оптимизировать и использовать для указанной компенсации.

Для решения поставленной задачи было необходимо изучить влияние напряженностей рабочего ($\mathbf{H}_{op}$) и дополнительного ($\mathbf{H}_0$) магнитных полей, а также их взаимной ориентации на величину S .

Методика измерений продольного коэффициента экранирования магнитного экрана

Экспериментальная оценка продольного коэффициента экранирования двухслойного магнитного экрана серийных малогабаритных РАЧ проводилась на установке, описанной в нашей работе [10]. Установка содержала магнитную систему из трех пар колец Гельмгольца, в центре которой размещались малогабаритные РАЧ, подключенные к схеме регистрации вариаций их частоты. С помощью катушек Гельмгольца полностью (с точностью до десятков нТл) компенсировалось геомагнитное поле в зоне размещения РАЧ и создавалось дополнительное постоянное магнитное поле $\mathbf{H}_0$ различной напряженности. Вектор $\mathbf{H}_0$ был ориентирован сонаправлено (ориентация $\uparrow\uparrow$) либо противоположно направлено (ориентация $\uparrow\downarrow$) относительно рабочего магнитного поля $\mathbf{H}_{op}$. Экран был изготовлен из ферромагнитного сплава пермаллоя 79 НМ. Определение продольного коэффициента экранирования S для обеих ориентаций ($\uparrow\uparrow$ и $\uparrow\downarrow$) рабочего и дополнительного магнитных полей проводилось путем измерения сдвига частоты РАЧ относительно частотного эталона при двух фиксированных значениях тока в катушке, создающей рабочее магнитное поле $\mathbf{H}_{op}$.

Значение величины $|\mathbf{H}_{op}|$ находили с помощью известного выражения для частоты рабочего перехода РАЧ (см. монографию [5]) с добавлением компоненты ΔH_{in} :

$$\nu = \nu_0 + \beta \cdot (H_{op} \pm \Delta H_{in})^2, \quad (1)$$

где ν_0 — частота атомного перехода для атомов ^{87}Rb ($\nu_0 = 6,835$ МГц); β — коэффициент пропорциональности ($\beta = 90,5$ мГц·м²/А²); ΔH_{in} — компонента внешнего дополнительного поля $\mathbf{H}_0$, проникающая внутрь магнитного экрана и ориентированная соосно с рабочим магнитным полем $\mathbf{H}_{op}$. Значение последнего в РАЧ обычно составляет порядка десяти А/м [5].

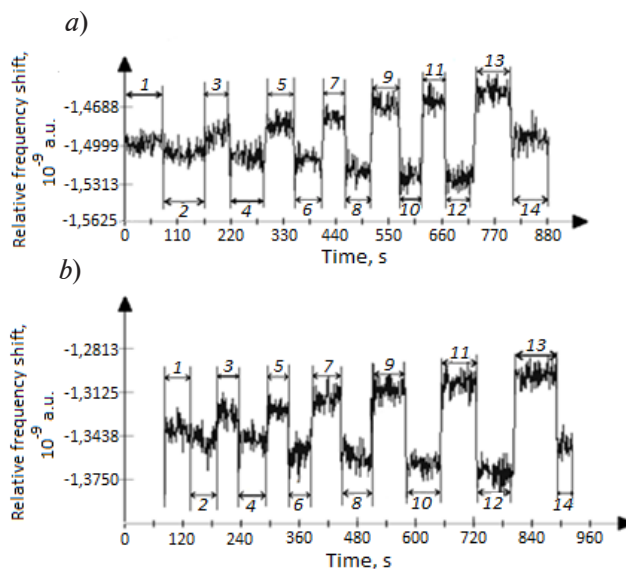
В наших экспериментах измерение продольного коэффициента экранирования проводилось при двух значениях H_{op} : 11,68 и 12,16 А/м.

Значения приращений поля $\pm \Delta H_{in}$ (они действуют внутри экрана и обусловлены приращениями поля $\pm \Delta H_0$), необходимые для последующих вычислений продольного коэффициента экранирования экрана РАЧ, определяли через измерения разности частот исследуемых РАЧ и частотного эталона по формуле (1).

В отличие от методики, приведенной в нашей работе [9], в данной работе не использовалось внешнее вращающееся магнитное поле; в нем не было надобности, поскольку исследование было посвящено влиянию на РАЧ приращений дополнительного поля $\Delta \mathbf{H}_0$, имитирующего геомагнитное поле Земли.

Измерения продольного коэффициента экранирования

На рисунке приведены примеры осциллограмм относительного сдвига частоты РАЧ в диапазоне приращений напряженности магнитного поля ΔH_0 , равном 5 — 30 А/м, а в табл. 1 представлены соответствующие значения относительного сдвига частоты РАЧ.



Числа над отрезками выражают номера периодов (см. табл. 1).

Таблица 1

Значения относительного сдвига частоты рубидиевых атомных часов при различных приращениях напряженности внешнего магнитного поля и двух значениях рабочего магнитного поля H_{op}

Номер периода	Приращение внешнего магнитного поля ΔH_0 , А/м	Относительный сдвиг частоты, 10^{-9} отн. ед.	
		$H_{op} = 11,68$ А/м	$H_{op} = 12,16$ А/м
1	0	-1,4990	-1,3396
2	+5	-1,5047	-1,3449
3	-5	-1,4881	-1,3201
4	+10	-1,5083	-1,3463
5	-10	-1,4831	-1,3251
6	+15	-1,5113	-1,3539
7	-15	-1,4771	-1,3184
8	+20	-1,5196	-1,3576
9	-20	-1,4655	-1,3112
10	+25	-1,5259	-1,3645
11	-25	-1,4635	-1,3062
12	+30	-1,5262	-1,3707
13	-30	-1,4552	-1,3009
14	0	-1,4917	-1,3521

В качестве эталона частоты, относительно частоты которого измерялся частотный сдвиг РАЧ, использовались малогабаритные РАЧ, однотипные исследуемым. Эти малогабаритные часы были расположены вне магнитной системы, создающей приращение ΔH_0 .

Для определения продольного коэффициента экранирования S было использовано следующее выражение:

$$S = \Delta H_0 / \Delta H_{in}. \quad (2)$$

На основании данных табл. 1, по формуле (2) (и с учетом выражения (1)) были вычислены значения продольного коэффициента экранирования S для различных комбинаций взаимного направления векторов $\mathbf{H}_{op}$ и $\mathbf{H}_0$. Результаты этих вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сводная таблица значений коэффициента продольного экранирования для двух значений рабочего магнитного поля $\mathbf{H}_{op}$ и его ориентации относительно внешнего поля $\mathbf{H}_0$

ΔH_0 , А/м	Значение коэффициента продольного экранирования S			
	$H_{op} = 11,68$ А/м		$H_{op} = 12,16$ А/м	
	↑↑	↑↓	↑↑	↑↓
5	128	329	89	294
10	181	366	219	294
15	200	398	225	323
20	178	310	250	351
25	665	293	240	320
30	205	352	250	305
40	294	265	305	234
60	288	290	307	209
80	313	290	260	173

Обозначения: ΔH_0 – приращение внешнего магнитного поля; ↑↑ и ↑↓ – взаимная ориентация магнитных полей $\mathbf{H}_0$ и $\mathbf{H}_{op}$.

Из данных табл. 2 следует, что наибольшее расхождение в значениях коэффициента экранирования S для ориентаций внешнего дополнительного ($\mathbf{H}_0$) и рабочего ($\mathbf{H}_{op}$) магнитных полей (обозначены как ↑↑ и ↑↓) наблюдается в области значений $\Delta H_0 = 5$ А/м, т. е. там, где магнитная проницаемость материала магнитного экрана (пермаллоя) претерпевает наиболее резкое изменение функции внешнего постоянного магнитного поля [11], причем по порядку его величина сравнима с напряженностью геомагнитного поля на орбите спутников навигационных систем. Динамика изменения коэффициента экранирования как функции модулей векторов $\mathbf{H}_{op}$ и $\mathbf{H}_0$ и направлений их взаимной ориентации дает возможность определять значение коэффициента экранирования для различных комбинаций как напряженностей, так и направлений этих полей. Информация, относящаяся к коэффициенту экранирования, позволяет определять параметры намагничивающего поля, направленного перпендикулярно оси магнитного экрана, для повышения его коэффициента экранирования [9], а также обеспечивать возможность компенсации влияния вариаций внешнего магнитного поля на частоту РАЧ.

Заключение

Анализ полученных в работе результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Продольный коэффициент экранирования магнитного экрана РАЧ существенно

зависит как от напряженностей рабочего и дополнительного намагничивающего магнитных полей, так и от их взаимной ориентации.

2. При этом максимальное различие в коэффициентах экранирования для двух противоположных ориентаций дополнительного намагничивающего поля H_0 и рабочего поля H_{op} наблюдается для значений приращения поля $\Delta H_0 \approx 5$ А/м, что примерно соответствует геомагнитному полю на орбите навигационных спутников.

3. Полученная зависимость коэффициента экранирования имеет принципиальное значение для коррекции частоты РАЧ на основе использования данных об изменении величины и направления внешнего магнитного поля при движении спутника по орбите.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куршин А. В. Повышение точности определения местоположения потребителей ГЛОНАСС путем увеличения частоты закладок временной информации на спутники // Труды МАИ. 2012. № 57. С. 1–7.
2. Svehla D. Geometrical theory of satellite orbits and gravity field (Part of Book Series “Springer Theses”). Cham, Switzerland: Springer, 2018. 542 p.
3. Бандура А. С. Оценка точности данных навигационных сообщений космических аппаратов спутниковых радионавигационных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2006. № 6 (29). С. 215–221.
4. Dinkelaker A. N., Kaparthy A., Reher S. E., Krutzik M. Optical quantum technologies for compact rubidium vapor-cell frequency standards in space using small satellites // Journal of the British Interplanetary Society. 2019. Vol. 72. No. 3. Pp. 74–82.
5. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. Пер. с англ. М.: Физматлит, 2009, 512 с.
6. Donley E. A., Hodby E., Hollberg L., Kitching J. Demonstration of high-performance compact magnetic shields for chip-scale atomic devices // Review of Scientific Instruments. 2007. Vol. 78. No. 8. P. 083102.
7. Ermak S., Semenov V. The influence of the operation magnetic field modulation on the short-term frequency stability of rubidium atomic clock at magnetic gradient // Proceedings of 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech), 20–21 October, 2022. St. Petersburg. Pp. 347–350.
8. Духина Н. Г., Мирющенко Н. И., Плешанов С. А., Ревенко К. В., Чугунов В. В. Исследование эффективности экранирования прецизионных бортовых цезиевых АЛТ-ЛН // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. 2020. № 4 (547). С. 37–52.
9. Ермак С. В., Семенов В. В., Баранов А. А., Рогатин М. А., Сергеева М. В. Влияние намагничивания экрана на вариации частоты бортовых атомных часов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2024. Т. 17. № 1. С. 56–63.
10. Лозов Р. К., Ермак С. В., Семенов В. В., Ермак О. В. Моделирование влияния геомагнитного поля на точность атомных часов бортовой аппаратуры систем спутниковой навигации // Радиотехника. 2019 Т. 83 № 12 (20). С. 32–37.
11. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. М.: Мир, 1987. 420 с.

REFERENCES

1. Kurshin A. V., Improving the accuracy of GLONASS positioning consumers by increasing the refresh rate of satellite clock information, Trudy MAI. (57) (2012) 10 (in Russian).
2. Svehla D., Geometrical theory of satellite orbits and gravity field (Part of Book Series “Springer Theses”), Springer, Cham, Switzerland, 2018.
3. Bandura A. S., Evaluation of the accuracy of the data of navigation messages of spacecraft of satellite radio navigation systems, Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt. (6(29)) (2006) 215–221 (in Russian).
4. Dinkelaker A. N., Kaparthy A., Reher S. E., Krutzik M., Optical quantum technologies for compact rubidium vapor-cell frequency standards in space using small satellites, J. Br. Interplanet. Soc. 72 (3) (2019) 74–82.

5. Riehle F., Frequency standards: Basics and applications, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, Germany, 2004.
6. Donley E. A., Hodby E., Hollberg L., Kitching J., Demonstration of high-performance compact magnetic shields for chip-scale atomic devices, Rev. Sci. Instrum. 78 (8) (2007) 083102.
7. Ermak S., Semenov V., The influence of the operation magnetic field modulation on the short-term frequency stability of rubidium atomic clock at magnetic gradient, Proc. 2022 Int. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), 20–21 Oct. 2022., St. Petersburg. (2022) 347–350.
8. Dukhina N. G., Miryushchenko N. G., Pleshanov S. A., et al., The shielding efficiency investigation of precision airborne cesium atomic-beam tubes (ABT) with laser pumping (LP), Elektronnaya Tekhnika [Electronic Engineering], Series 1: Microwave Engineering. (4(547)) (2020) 37–52 (in Russian).
9. Ermak S. V., Semenov V. V., Baranov A. A., et al., Effect of shield magnetization on variations in the frequency of onboard rubidium atomic clocks, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 17 (1) (2024) 56–63 (in Russian).
10. Lozov R. K., Ermak S. V., Semenov V. V., Ermak O. V., Modeling the geomagnetic field influence on the atomic clock accuracy of the satellite navigation systems on-board equipment, J. Radioeng. 83 (12-2) (2019) 32–37 (in Russian).
11. Chikazumi S., Physics of ferromagnetism (Series of Monographs on Physics), Oxford University Press, Oxford, UK, 2009.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕРМАК Сергей Викторович — доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
 serge_ermak@mail.ru
 ORCID: 0000-0002-6210-4003

СЕМЕНОВ Владимир Васильевич — доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
 vladimir_semenov@mail.ru
 ORCID: 0000-0003-0346-8349

СЕРГЕЕВА Мария Вячеславовна — инженер Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
 mamarvel2001@mail.ru
 ORCID: 0009-0005-8838-6845

THE AUTHORS

ERMAK Sergey V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
 serge_ermak@mail.ru
 ORCID: 0000-0002-6210-4003

SEME NOV Vladimir V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
 vladimir_semenov@mail.ru
 ORCID: 0000-0003-0346-8349

SERGEEVA Maria V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

mamaryl2001@mail.ru

ORCID: 0009-0005-8838-6845

*Статья поступила в редакцию 09.07.2024. Одобрена после рецензирования 28.11.2024.
Принята 28.11.2024.*

Received 09.07.2024. Approved after reviewing 28.11.2024. Accepted 28.11.2024.