

## **Исследование невзаимного устройства на основе постоянного магнита для зеемановского лазерного гироскопа**

**Кудрявцев А.С.\* , Савченко Н.А.\*\* , Савельев И.И.\*\*\***

*Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха,  
ул. Введенского, 3, корп.1, Москва, 117342, Россия*

*\*e-mail: akudr-delta@yandex.ru*

*\*\*e-mail: sav4nik@gmail.com*

*\*\*\*e-mail: i.saveliev@gmail.com*

***Статья поступила 04.02.2020***

### **Аннотация**

В работе впервые исследована зависимость частотной невзаимности, возникающей в зеемановском лазерном гироскопе при наложении на его активную среду продольного магнитного поля постоянного кольцевого магнита с учётом нелинейности дисперсионной функции показателя преломления активной среды и неоднородного распределения магнитного поля вдоль активной среды у магнитов кольцевой формы.

Неоднородность магнитного поля всегда присутствует в невзаимном устройстве зеемановских лазерных гироскопов в силу особенностей распределения поля постоянного кольцевого магнита и моноблочной конструкции лазера.

В работе показано, что в зависимости показателя преломления от напряжённости магнитного поля, приложенного к активной среде существует максимум.

Неоднородность продольного магнитного поля кольцевого постоянного магнита приводит к значительному снижению амплитуды частотной подставки в зеемановском лазерном гироскопе.

В работе экспериментально определена неоднородность продольного магнитного поля кольцевого магнита.

Предложен способ оценки максимально возможной амплитуды частотной подставки, которая может быть получена в зеемановском лазерном гироскопе при использовании в невзаимном устройстве кольцевого постоянного магнита для создания продольного магнитного поля.

**Ключевые слова:** кольцевой зеемановский лазер, невзаимное устройство, постоянный магнит, соленоид, смещение нуля, частотная подставка.

## 1. Введение

Зеемановские лазерные гироскопы используются в системах БИНС для получения информации о вращении летательного аппарата в пространстве [1,2].

В современных лазерных гироскопах для преодоления явления «захвата» и повышения точности создаётся разность частот встречных волн, значительно превышающая пороговую частоту захвата [3-6]. Эта разность частот называется частотной подставкой.

В зеемановских лазерных гироскопах (ЗЛГ) частотная подставка создаётся путём наложения продольного магнитного поля непосредственно на активную среду кольцевого лазера [7]. Источником магнитного поля в ЗЛГ традиционно является

соленоид. Однако, соленоид требует дополнительного энергопотребления и увеличивает тепловыделение в кольцевом лазере, что приводит к нестабильности смещения нуля частотной характеристики ЗЛГ [8, 9,10]. Постоянные магниты могут обеспечить большую величину магнитного поля при одинаковых габаритах с соленоидом и соответственно большую частотную подставку, а также уменьшить величину энергопотребления и теплового дрейфа.

Однако при этом возникает вопрос о стабильности величины напряжённости магнитного поля, поскольку его нестабильность будет приводить к погрешности ЗЛГ [11].

Постоянные магниты могут значительно снизить чувствительность ЗЛГ к внешним магнитным полям наравне с уже имеющимися методами, что повысит стабильность частотной подставки [11-16].

Целью настоящего исследования является выяснение условий для получения максимально возможной амплитуды частотной подставки в ЗЛГ с помощью кольцевого постоянного магнита при наличии сильной неоднородности напряженности продольного магнитного поля.

## **2. Зависимость частотной подставки от напряженности однородного магнитного поля в невзаимном устройстве на эффекте Зеемана**

Дисперсионная зависимость изменения показателя преломления активной среды  $\Delta n$  от относительной расстройки резонатора  $\xi$ , вызванной магнитным полем, описывается выражением [17,18]:

$$\Delta n = -2s\xi e^{-\xi^2} \quad (1)$$

$s$  – безразмерный коэффициент, зависящий от потерь в резонаторе и усиления активной среды, для типичных параметров резонатора равный  $4 \times 10^{-4}$ .

$\xi$  – относительная расстройка частоты резонатора от максимума кривой усиления.

Зависимость изменения показателя преломления от относительной расстройки  $\xi$  для  $s = 4 \times 10^{-4}$  приведена на рисунке 1.

Расстройка резонатора в зависимости от напряженности магнитного поля определяется формулой [7]:

$$\xi = \frac{\mu_B H}{ku} \quad (2)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля, Э,

$ku = 875$  МГц [19] – доплеровский параметр,

$k$  – волновое число излучения кольцевого лазера,  $\text{см}^{-1}$ ,

$u$  – средняя тепловая скорость атомов активной среды,  $\text{см/с}$ ,

$\mu_B = 1,82$  МГц/Э – магнетон Бора.

Снижение чувствительности к внешним магнитным полям достигается за счет того, что на активную среду кольцевого лазера накладывается магнитное поле такой напряженности, что дисперсионная зависимость (1) показателя преломления активной газовой среды от относительной расстройки частоты кольцевого лазера переходит в зону нелинейности. При определенном значении напряженности магнитного поля дисперсионной функцией достигается экстремум, что приводит к снижению чувствительности кольцевого лазера к внешним магнитным полям и

изменениям температуры, а также делает амплитуду частотной подставки максимальной [13,17].

Продифференцируем функцию (1) и определим её экстремумы:

$$\xi = \pm 0,707$$

Напряженность магнитного поля, соответствующая экстремумам функции (1), определяется из выражения:

$$H = \pm 0,707 \frac{ku}{\mu_B}$$

Иными словами, значения напряженности магнитного поля, соответствующие экстремумам функции (1) равняются:

$$H_{extr} = \pm 339 \text{ Э} \quad (3)$$

В переводе на единицы индуктивности, оптимальное значение (3) составит 33,9 мТл.

### **3. Снижение чувствительности к изменению магнитного поля при наложении однородного магнитного поля оптимальной напряженности**

При наложении на активную среду напряженности магнитного поля (3) соответствующей экстремуму функции (1) изменение показателя преломления оказывается в зоне нелинейности. С точки зрения чувствительности ЗЛГ к изменению магнитного поля, напряженность (3) является оптимальной для создания частотной подставки.

Проведём оценку снижения чувствительности кольцевого лазера при наложении на его активную среду однородного магнитного поля оптимальной напряженности и его стабилизации с точностью в 1%. Вид дисперсионной зависимости (1) представлен на рисунке 1.

Буквами  $M_i$  – на рисунке представлены точки, соответствующие оптимальной напряженности магнитного поля. Рядом с этими точками на рисунке 1 представлен расчёт максимального изменения показателя преломления у максимума дисперсионной функции при расстройке от данного значения на 1%.

Буквами  $m_i$  – на рисунке представлены точки, соответствующие линейному участку дисперсионной функции. Рядом с этими точками на рисунке 1 представлен расчёт максимального изменения показателя преломления на линейном участке дисперсионной функции при одинаковой с предыдущем случаем расстройке относительно нуля функции.

Также на графической плоскости рисунка 1 представлено соотношение максимальных изменений показателей преломления для обоих рассмотренных случаев расстройки.

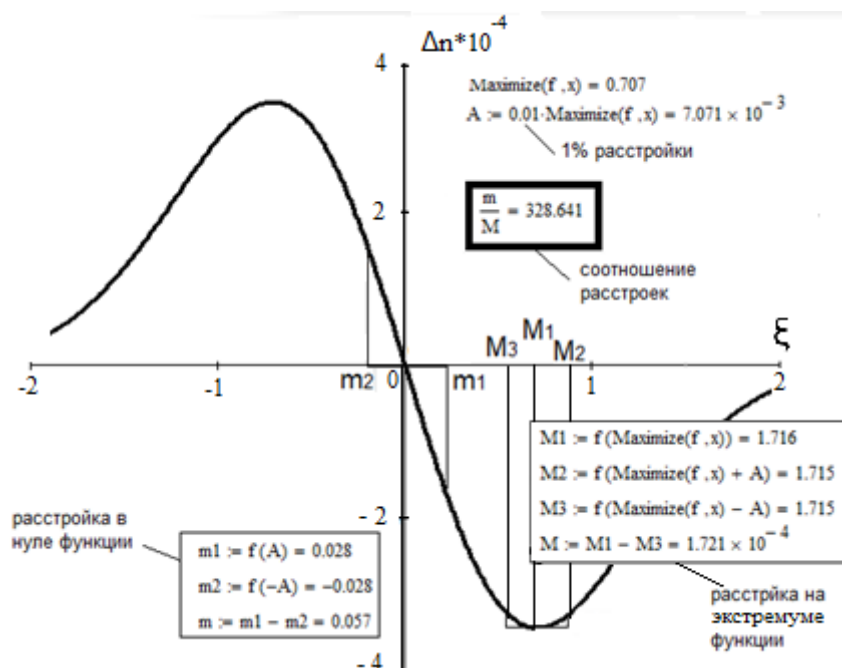


Рисунок 1 – Изменение дисперсионной зависимости показателя преломления активной среды кольцевого лазера от его относительной расстройки (2).

На графической плоскости приведён расчёт соотношения расстроек при изменении относительной расстройки относительно выделенных значений на  $\pm 1\%$ .  $M_i$  – значения  $\xi$  соответствующие оптимальной напряженности магнитного поля.  $m_i$  – значения  $\xi$  соответствующие линейному участку дисперсионной функции.

При расстройке резонатора в 1% относительно максимума дисперсионной функции, показатель преломления изменится на  $1,721 \cdot 10^{-4}$  единиц, а при такой же расстройке резонатора на линейном участке функции, показатель преломления изменится на  $5,656 \cdot 10^{-2}$  единиц.

Оценка показывает, что при стабилизации магнитного поля подставки вблизи оптимального значения с точностью 1% ошибка, вызванная изменением магнитного поля, наложенного на активную среду может быть уменьшена более чем в 300 раз.

#### **4. Экспериментальное определение распределения продольной составляющей индукции магнитного поля на оси кольцевого магнита**

При помощи миллитесламетра ТПУ-01 было проведено измерение индукции магнитного поля на оси кольцевого магнита из материала НМБ 280/160 изображенного на рисунке 2 [20]. Затем индукция продольного осевого магнитного поля была переведена в единицы напряженности магнитного поля, для упрощения расчёта зависимости показателя преломления активной среды вдоль оси кольцевого магнита.

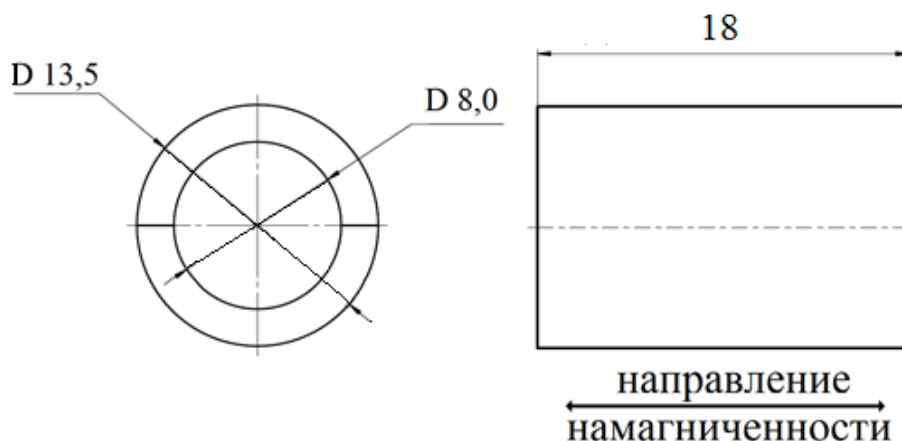


Рисунок 2 – Схемы магнитного кольца из НМБ 280/160 использованного для эксперимента по определению неоднородности магнитного поля на оси кольцевого магнита.

Распределение напряжённости магнитного поля и соответствующего ему изменения показателя преломления на оси магнитного кольца, изображенного на рисунке 2, представлено на рисунке 3. Расчёт изменения показателя преломления произведён по формуле (1). По оси абсцисс взято расстояние соответствующее полной длине газоразрядного промежутка зеемановского лазерного гироскопа.





Рисунок 3 – Зависимость продольной составляющей напряженности магнитного поля (синий пунктир) и изменение показателя преломления активной среды (красная линия) в зависимости от положения вдоль оси кольцевого магнита из NdFeB 280/160. Зелёными линиями показаны границы торцов магнита.

На рисунке 3 наблюдается неоднородный характер распределения напряженности магнитного поля. Имеются зоны с отрицательной напряженностью магнитного поля за пределами магнитного кольца, а также в центре магнита, на его оси наблюдается неоднородность магнитного поля.

##### 5. Оценка амплитуды частотной подставки для неоднородного магнитного поля в невзаимном устройстве на эффекте Зеемана

В конфигурации магнитного поля на рисунке 3 отрицательные зоны, находящиеся на оси газоразрядного промежутка (ГРП) за пределами магнитного кольца, вносят в изменение показателя преломления больший вклад, чем положительная зона, находящаяся под магнитом. Данный эффект вызван тем, что

напряженность магнитного поля на оси ГРП под ниодимовым магнитом значительно превышает оптимальное значение напряженности магнитного поля, из выражения (3). Величина частотной подставки, в данной конфигурации, составит - 1,8 кГц.

Используя результат, приведённый в выражении (3), и результаты, представленные на рисунке 1, положим, что под магнитом должно быть наложено аксиальное магнитное чьё значение должно быть равно, примерно 340 Э.

Исходя из вышеприведённых положений, было промоделировано оптимальное распределение напряжённости магнитного поля и соответствующего ему изменения показателя преломления на оси магнитного кольца представленное на рисунке 4.

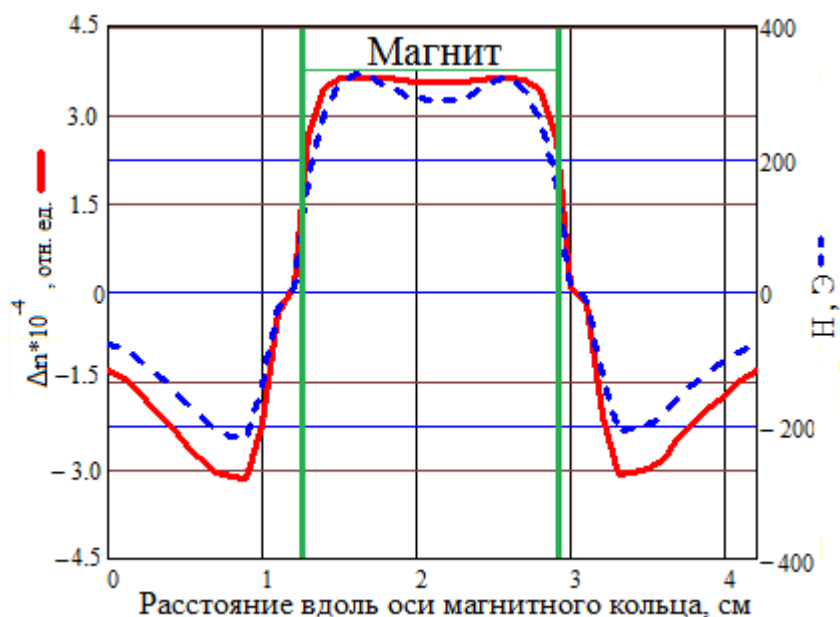


Рисунок 4 – Расчёт зависимости оптимальной напряженности магнитного поля (синий пунктир) и изменение показателя преломления активной среды (красная линия) в зависимости от положения вдоль оси кольцевого магнита. Зелёными линиями показаны границы торцов магнита.

В оптимальной конфигурации магнитного поля отрицательные зоны, находящиеся на оси ГРП за пределами магнитного кольца, вносят в изменение показателя преломления значительно меньший вклад, чем положительная зона, находящаяся под магнитом. Величина частотной подставки составляет 13,8 кГц.

Неоднородность напряженности магнитного поля в центре магнита, нивелируется нелинейной зависимостью показателя преломления от напряжённости магнитного поля.

## **6. Заключение**

В работе определено, что в зависимости частотной подставки от напряженности магнитного поля имеется максимум. При типичных параметрах кольцевого лазера максимум частотной невзаимности в случае однородного магнитного поля достигается при напряженности магнитного поля примерно в 340 Эрстед. Это значение является оптимальным и с точки зрения минимальной чувствительности к изменению, как поля самого магнита, так и внешних магнитных полей.

Неоднородность продольного магнитного поля постоянного кольцевого магнита приводит к значительному снижению среднего магнитного поля и частотной невзаимности. Повышение среднего магнитного поля не позволяет достичь большей амплитуды частотной подставки из-за нелинейного характера дисперсионной функции активной среды.

По этой причине необходимо делать распределение магнитного поля по возможности равномерным, а его величину внутри кольцевого магнита примерно равной оптимальной величине, определённой в настоящей работе.

### Библиографический список

1. Старовойтов Е.И., Юрчик И.А. Оптимизация характеристик авиационного радиолокатора с синтезированной апертурой и его системы микронавигации // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109500>
2. Савельев В.М., Антонов Д.А. Выставка бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата на подвижном основании // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: [http://trudymai.ru/published.php?ID=25497&PAGEN\\_2=2](http://trudymai.ru/published.php?ID=25497&PAGEN_2=2)
3. Лукьянов Д.П., Филатов Ю.В., Голяев Ю. Д., Курятов В.Н. и др. 50 лет лазерному гироскопу // XX Санкт-Петербургская интернациональная конференция по интегрированным навигационным системам – СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 2013. С. 36 - 49.
4. Филатов Ю.В. Оптические гироскопы. - СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 2005. - 139 с.
5. Серёгин В.В., Кукуев Р.М. Лазерные гиromетры и их применение. - М.: Машиностроение, 1990. - 287 с.
6. Привалов В.Е. Газоразрядные лазеры в измерительных комплексах. – Л.: Судостроение, 1977. - 152 с.

7. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Савельев И.И. Зеемановские лазерные гироскопы // Квантовая Электроника. 2015. Т. 45. № 2. С. 171 - 179.
8. Колбас Ю.Ю., Грушин М.Е., Горшков В.Н. Немагнитная составляющая смещения нуля зеемановского лазерного гироскопа // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 3. С. 283 - 289.
9. Воробьёв П.Г., Кондрахин А.А., Мельничук Г.В., Улитенко А.И., Чуляева Е.Г. Исследование тепловых режимов, частотно-стабилизированных He-Ne лазеров // Фотоника. 2012. Т. 34. № 4. С. 40 – 48.
10. Воробьёв П.Г., Чуляева Е.Г. Частотно стабилизированные лазеры для точных измерений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 39 (2). С. 26 – 33.
11. Коневский Е.И., Колпакова Н.Ф. Температурная стабильность магнитных систем с магнитами из сплава типа Fe-Nd-B последнего поколения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. Т. 12. № 12. С. 291 - 294.
12. Савельев И.И., Кудрявцев А.С. Способ измерения угловых перемещений зеемановским лазерным гироскопом. Патент № 2688952 С1 РФ, G01C19/64, 23.05.2019.
13. Кудрявцев А.С., Савельев И.И., Савченко Н.А. Кольцевой зеемановский лазер с постоянной частотной подставкой // Труды конференции - конкурса молодых физиков. 2019. Т. 25. № 52. С. 235 – 238.
14. Кудрявцев А.С., Савельев И.И., Савченко Н.А. Исследование невзаимного устройства на основе постоянного магнита для зеемановского лазерного гироскопа //

11-ый Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики»: тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ, 2019. - 270 с.

15. Альтман А.Б., Верниковский Э.Е., Герберг А.Н., Гладышев П.А., и др. Постоянные магниты. Справочник. - М.: Энергия, 1971. - 376 с.

16. Вахитов Н.Г., Голяев Ю.Д., Дронов И.В., Иванов М.А., Колбас Ю.Ю., Крутиков А.П. Зеэмановский лазерный гироскоп с переключением продольных мод генерации // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. 2014. № 2. С. 10 - 27.

17. Лэмб У. Квантовая оптика и квантовая радиофизика. - М.: Мир, 1966. - 541 с.

18. Рыбаков Б.В., Скулаченко С.С., Хромых А.М., Юдин И.И. Метод измерения ударного уширения специальных линий // Soviet physics – JETP. 1973. Т. 37. № 4. С. 582 - 583. URL: [http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e\\_037\\_04\\_0582.pdf](http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_037_04_0582.pdf)

19. Кордовер Р.Х., Джаседжа Т.С., Джаван А. Измерение изотопического сдвига перехода 6328 А He-Ne лазера // Письма по прикладной физике. 1965. Т. 7. по. 12. С. 322 - 324.

20. Материалы магнитотвёрдые спечённые на основе сплава неодим-железо-бор. Классификация. Основные параметры. ГОСТ Р 52956-2008. - М.: Стандартинформ, 2008. - 12 с.