

Экспериментальное исследование зависимостей масштабного коэффициента лазерного гиromетра от температуры и скорости вращения

10, октябрь 2014

Авиев А. А.

УДК: 681.7.013

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

aviev.aleksey@gmail.com

Введение

Применение лазеров для измерения линейных и угловых перемещений началось с момента появления самих лазеров. Идея использования светового луча в кольцевом лазерном резонаторе вместо вращающихся механических масс оказалась весьма плодотворной как с научной, так и с практической точек зрения. Весьма быстро выявился целый ряд принципиальных преимуществ оптических, в первую очередь лазерных, гиromетров перед механическими: широкий динамический диапазон измеряемых угловых скоростей, малое время готовности после включения, устойчивость к значительным механическим перегрузкам, возможность прецизионного измерения числа и фазы оборотов вращающегося объекта и т.д. Эти преимущества, наряду с потенциально меньшей стоимостью и значительными перспективами совершенствования лазерных гиromетров, открыли пути их широкого практического применения в средствах управления движением самых разнообразных объектов и навигационных системах.

Наряду с многочисленными достоинствами лазерные гиromетры имеют и ряд недостатков. В реальности они отличаются существенной нелинейностью выходной характеристики, что приводит к погрешностям измерения скорости вращения и угла поворота. Основными искажениями выходной характеристики являются [1,2]:

- сдвиг нуля выходной характеристики;
- захват частот встречных волн;
- затягивание мод, проявляющееся вследствие изменения дисперсионных свойств активной среды и приводящее к нарушению стабильности масштабного коэффициента (МК).

Искажения, вызванные сдвигом нуля выходной характеристики, в настоящее время уменьшают путем технологического совершенствования кольцевых лазерных гиromетров (КЛГ), а также использования алгоритмической коррекции [3]. Для снижения влияния

связи встречных волн на работу лазера (явление захвата частот встречных волн) применяют, в основном, реверсивные (периодические) смещения рабочей точки – механические покачивания кольцевого лазера (КЛ) с помощью виброподвеса. При определённом подборе параметров колебаний виброподвеса в КЛГ реализуется режим частотной виброподставки, который дополнительно вносит погрешности в работу прибора. Ведутся работы по уменьшению этих погрешностей методами алгоритмической компенсации [4].

В данной работе особое внимание уделено нестабильности масштабного коэффициента. В настоящий момент эта погрешность компенсируется с помощью системы регулировки периметра (СРП) кольцевого лазера. Её дальнейшее уменьшение алгоритмическим способом является предметом данной работы.

1. Описание экспериментов

В ходе исследований были обнаружены зависимости масштабного коэффициента гиromетра от температуры и скорости вращения гиromетра относительно основания. Для изучения указанных зависимостей были проведены эксперименты, описанные ниже.

Функциональная схема экспериментальной установки, используемой в исследованиях, приведена на рис. 1. Лазерный гиromетр 1 установлен на поворотный стол 2, который поворачивает гиromетр относительно основания 3 с заданной скоростью и на нужное количество оборотов. Момент совершения гиromетром каждого полного оборота отслеживается с помощью автоколлиматора 4 и зеркальца 5, укрепленного на боковой поверхности лазерного гиromетра. Информация от гиromетра, фотоприёмника автоколлиматора и исполнительного устройства поворотного стола поступает на устройство обработки информации 6 (ЭВМ).

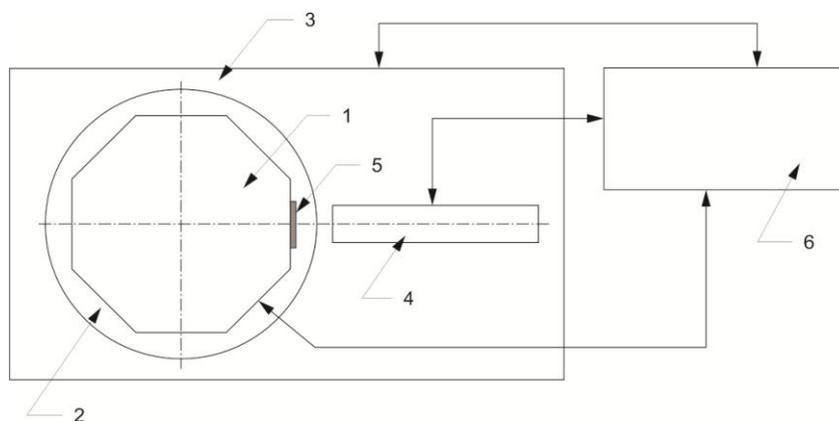


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для исследования поведения масштабного коэффициента лазерного гиromетра

Сначала выполняли эксперимент по определению температурной зависимости МК. После включения лазерного гиromетра поворотный стол совершал последовательно по пять оборотов в каждую сторону. Скорость вращения составляла приблизительно 70 град/с. Количество оборотов и момент прохождения нулевого положения фиксировались с

помощью автоколлиматора. В процессе работы гиrometer саморазогревался в диапазоне от +200С до +350С, которого оказалось достаточно для получения температурных характеристик МК. Устройство обработки информации регистрировало количество отсчётов (импульсов) лазерного гиromетра, время совершения пяти оборотов, скорость вращения подвижного основания, температуру КЛГ, МК и напряжение на исполнительном устройстве СРП.

Затем проводился эксперимент по определению зависимости МК от скорости вращения. Включённый лазерный гиrometer оставляли работать в течение нескольких часов, чтобы устройство разогрелось, и температура внутри прибора стабилизировалась. После этого гиrometer вращали: его несколько раз разгоняли, а затем останавливали, выполняя, таким образом, несколько замеров. Измерения снимались при скорости поворотного стола в диапазоне от 15 град/с до 150 град/с. Устройство обработки информации регистрировало те же параметры, что и в первом эксперименте.

2. Анализ температурной зависимости масштабного коэффициента и его алгоритмическая коррекция

В процессе проведения эксперимента по определению температурного поведения МК было сделано более 60 отсчётов. На рис. 2 показана зависимость МК (сплошная линия) от номера отсчёта для серийного прибора ГЛ2. Отсчёты снимались через равные промежутки времени.

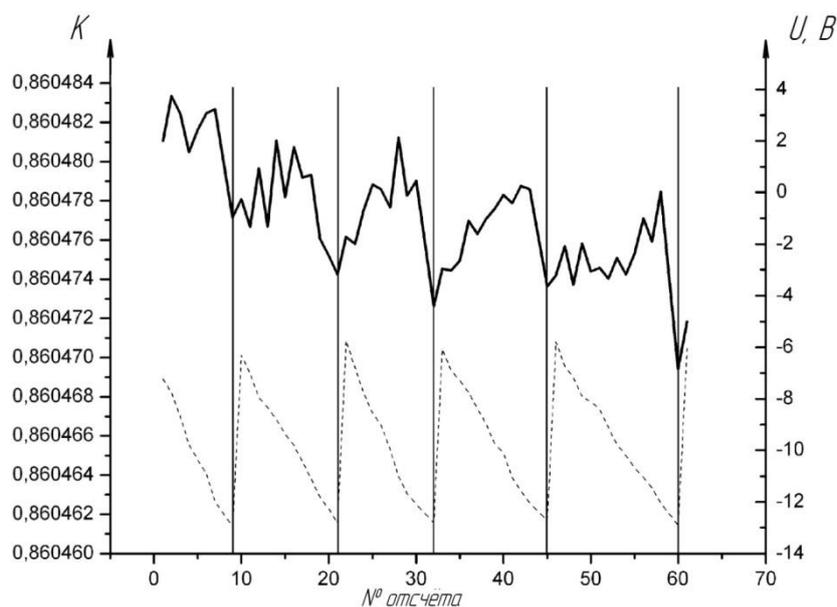


Рис. 2. График зависимости МК (сплошная линия) и напряжения питания нагревателя СРП (пунктирная линия) от номера отсчёта

Можно считать, что температура внутри прибора увеличивалась приблизительно линейно, поэтому каждый новый отсчёт соответствует приращению температуры на некоторую постоянную величину. С учётом сказанного, рис. 2 показывает комплексную зависимость изменения МК от температуры. С увеличением температуры значение МК имеет тенденцию к уменьшению, однако через приблизительно равные промежутки времени

(обозначены вертикальными линиями) можно видеть локальные увеличения и уменьшения его значений. Такое периодическое поведение МК связано с системой регулировки периметра (СРП) кольцевого резонатора. Периметр резонатора поддерживается постоянным в пределах двух длин волн при помощи исполнительного устройства СРП. Регулировка осуществляется за счёт изменения температуры воздуха внутри одного из каналов КЛГ с помощью специального нагревателя. Однако во время нагрева гиromетра периметр резонатора меняется более чем на 10 длин волн, что превышает диапазон регулировки, поэтому характер работы нагревателя – периодический: периметр поддерживается в пределах максимального и минимального напряжений в нагревателе. На рис. 2 пунктирной линией указано изменение напряжения питания нагревателя СРП для прибора ГЛ2. При достижении предельного значения устройство переключается на соседнюю моду излучения и удерживает её до наступления следующего предельного случая. Описанная ситуация отражается на поведении МК.

С учетом полученных результатов выполнен поиск зависимостей, описывающих комплексное температурное поведение МК. Его значение подвержено влиянию температуры и, как следствие, влиянию системы поддержания периметра КЛГ. В этом случае целесообразно разбить задачу анализа поведения МК на две подзадачи: анализ тенденции к уменьшению МК с возрастанием температуры и определение зависимости МК от напряжения нагревателя СРП.

Для решения первой из них было рассмотрено изменение МК в промежутках между максимальным и минимальным напряжениями нагревателя СРП. Для этого была сделана выборка значений МК по каждому периоду работы этого нагревателя. Полученные, таким образом, кривые показаны на рис. 3.

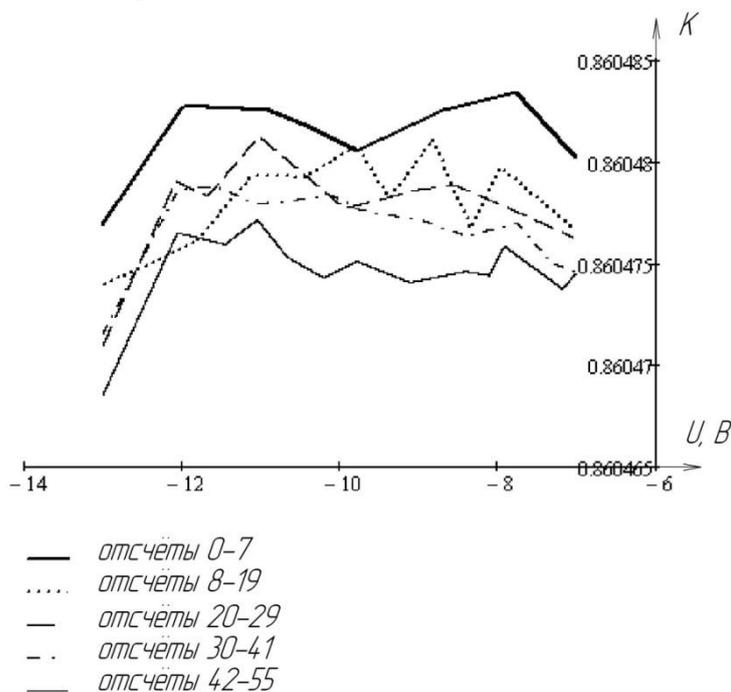


Рис. 3. Графики зависимостей МК от напряжения нагревателя в каждом периоде его работы

Используя их, были построены температурные зависимости МК при одном и том же напряжении на нагревателе. При каждом напряжении, таким образом, получалась отдельная кривая. Графики чистой температурной зависимости МК при различных напряжениях питания нагревателя показаны на рис. 4. Выполнив усреднение по этим кривым, получили характеристику, изображённую на рис. 5. Так выглядит усредненная зависимость МК непосредственно от температуры. На графике температура указана в условных единицах в соответствии с выходным сигналом термодатчика гироскопа. Между шкалами температуры в градусах Цельсия и в условных единицах существует линейная зависимость.

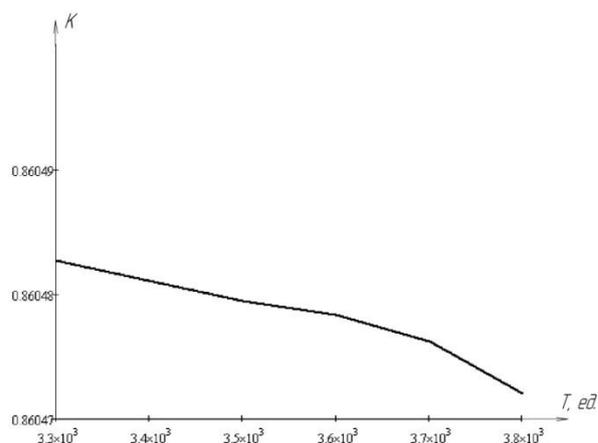
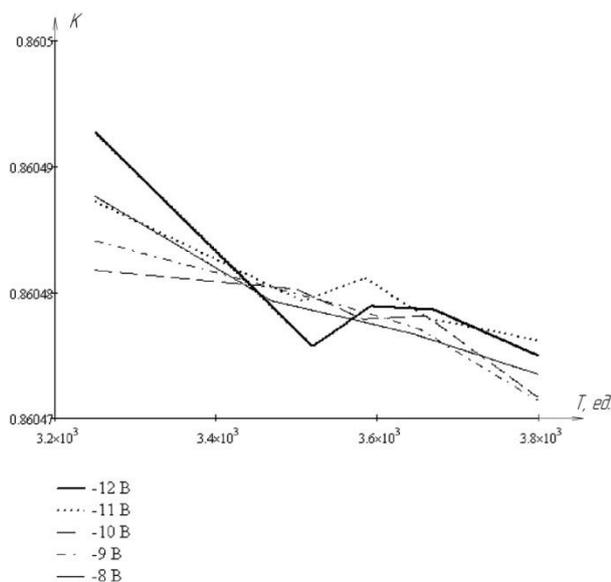


Рис. 5. График усреднённой чистой температурной зависимости МК

Рис. 4. Графики чистой температурной зависимости МК при различных напряжениях нагревателя СРП

В самом простом случае кривую, показанную на рис. 5, можно заменить одной прямой, а для получения более точной модели - использовать несколько прямых. Таким образом, можно получить функциональную зависимость вида $f_1(T) = k(T - T_0) + f_0$, где k , T_0 и f_0 определяются экспериментально. Данная функция описывает непосредственно температурное поведение МК. При расчёте скорости вращения можно корректировать фиксированное значение МК, заложенное в приборе, с учётом этой функции. Функция $f_1(T)$ должна быть нормирована.

При решении второй подзадачи была выявлена зависимость МК от напряжения нагревателя СРП. Для этого осуществлялась корректировка МК с помощью установленной функциональной зависимости. Результат такой коррекции показан на рис. 6. Кривые, изображённые на рис. 3, после коррекции выглядят так, как показано на рис. 7. По этим кривым получили усредненную характеристику, изображённую на рис. 8.

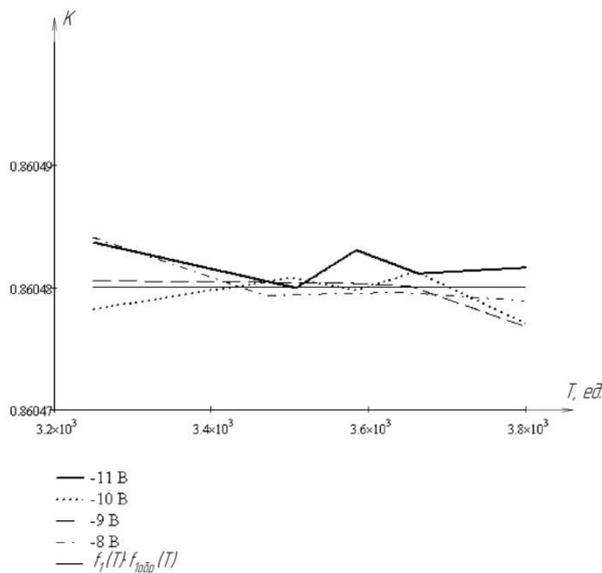


Рис. 6. Графики чистой температурной зависимости МК после коррекции с помощью функции $f_1(T)$ при различных напряжениях нагревателя СРП

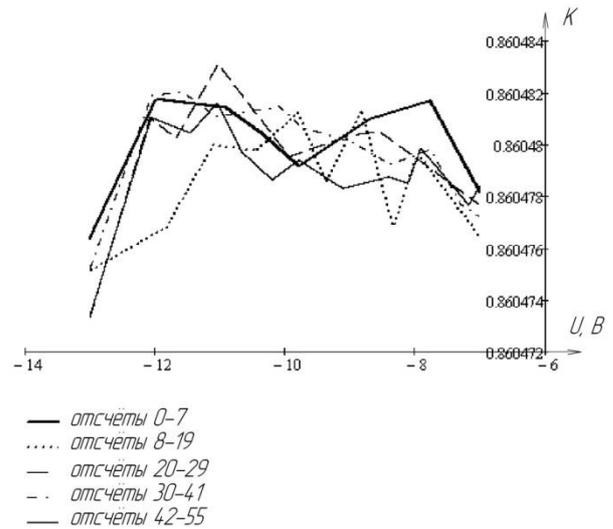


Рис. 7. Графики зависимостей МК от напряжения нагревателя в каждом периоде его работы после коррекции с помощью функции $f_1(T)$

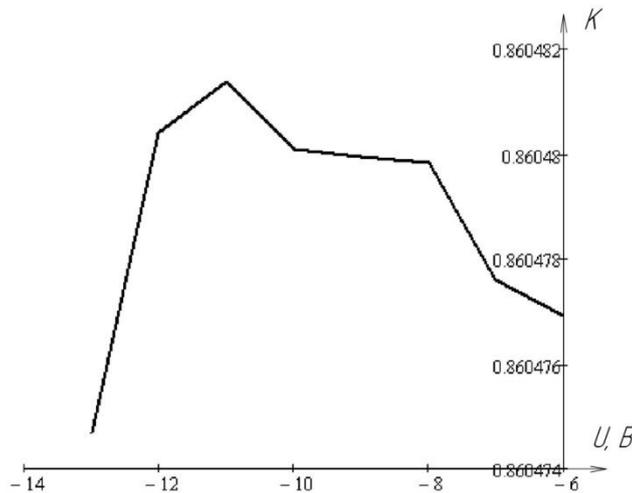


Рис. 8. График усреднённой зависимости МК от напряжения нагревателя СРП

Полученную кривую предлагается заменить гиперболой. Сместив положение асимптот гиперболы и выполнив преобразование поворота относительно текущей системы координат, можно получить функцию вида $f_2(U) = k(U - U_0) + a_0 + a$, где k , U_0 , a_0 и a определяются экспериментально. График этой функции, наложенный на кривую, изображённую на рис. 8, показан на рис. 9. Функция $f_2(U)$ тоже должна быть нормирована.

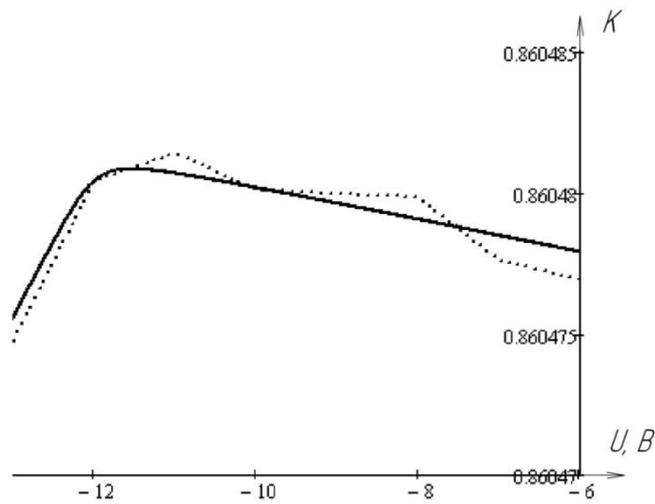


Рис. 9. График модельной гиперболы и усреднённой зависимости МК от напряжения нагревателя СРП

Таким образом, фиксированное значение МК, заложенное в приборе, можно корректировать с помощью двух функций $f_1(T)$ и $f_2(U)$ путем умножения на них, при этом получается его уточнённое значение. Определяемое при этом значение скорости также окажется более точным. Результаты коррекции с помощью функций $f_1(T)$ и $f_2(U)$ отражены на рис. 10, 11 и 12.

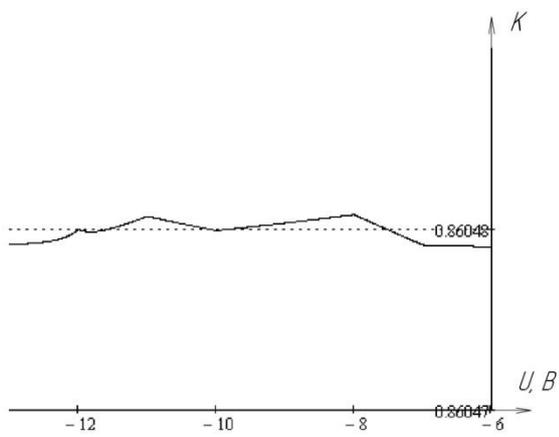
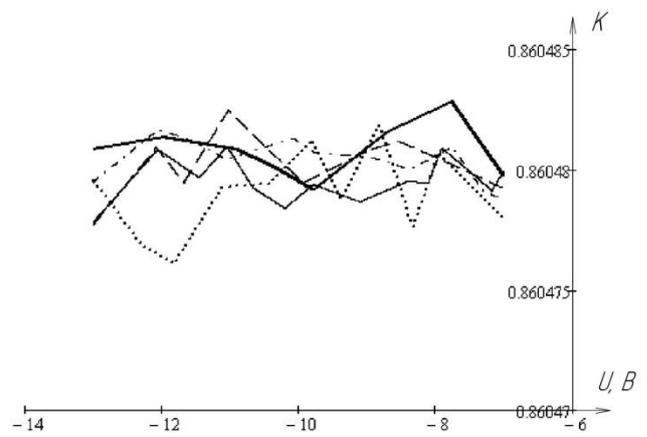


Рис. 10. Усреднённая зависимость МК от напряжения нагревателя СРП после коррекции с помощью функции $f_2(U)$



- отсчеты 0-7
- отсчеты 8-19
- отсчеты 20-29
- · отсчеты 30-41
- отсчеты 42-55

Рис. 11. Графики зависимостей МК от напряжения нагревателя в каждом периоде его работы после коррекции с помощью функций $f_1(T)$ и $f_2(U)$

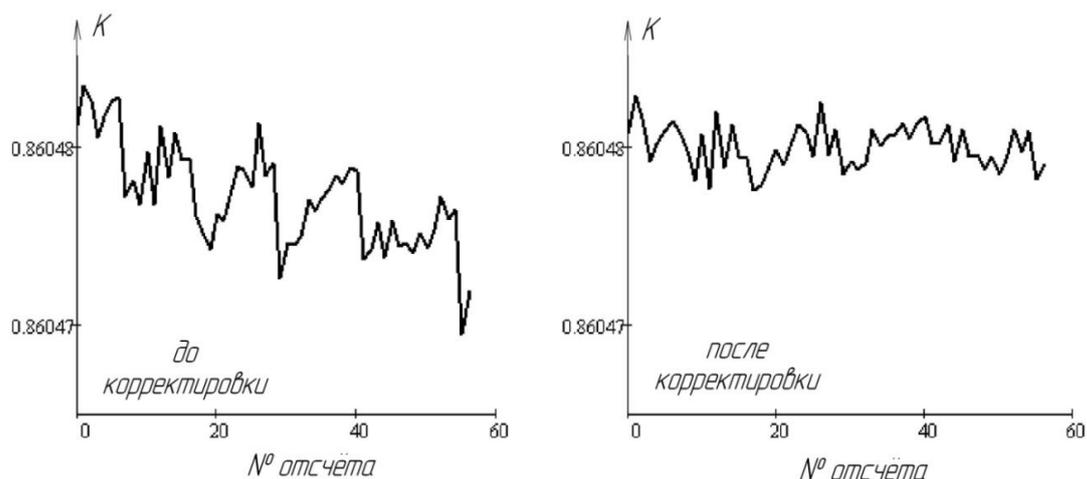


Рис. 12. Поведение масштабного коэффициента до комплексной температурной корректировки и после нее

Отметим, что разница между абсолютными значениями МК после температурной корректировки уменьшилась в два раза.

3. Анализ зависимости масштабного коэффициента от скорости вращения гиromетра и его алгоритмическая коррекция

Эксперимент показал, что МК лазерного гиromетра не остаётся постоянным при различной скорости, а меняется по нелинейному закону. Были рассмотрены значения МК для трёх замеров; соответствующие зависимости приведены на рис. 13. Результат усреднения данных, полученных за три замера, представлен на рис. 14.

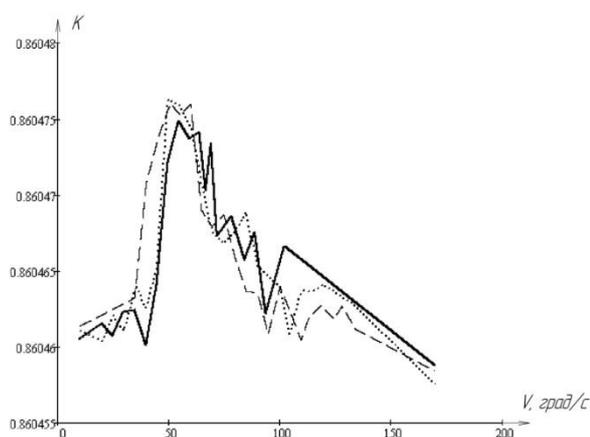


Рис. 13. Графики зависимостей масштабного коэффициента от скорости вращения гиromетра

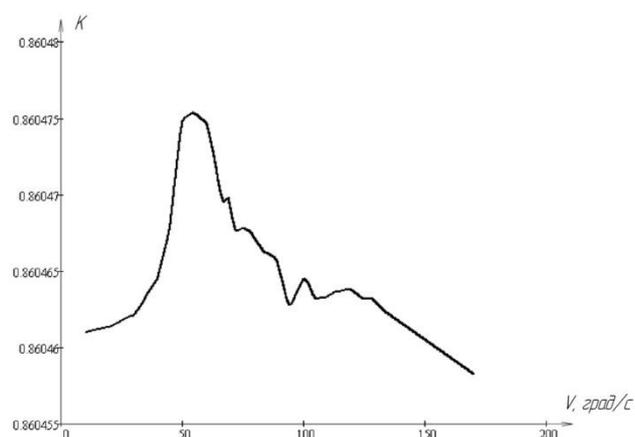


Рис. 14. Усреднённая зависимость масштабного коэффициента от скорости вращения гиromетра

Анализ показал, что аппроксимация зависимости, приведённой на рис. 14, какой-либо аналитической кривой неэффективна. Коррекция получается при этом неудовлетворительной. Более эффективной является коррекция с использованием таблиц поправочных

коэффициентов. При этом предполагается, что в процессе работы прибора в каждый момент времени скорость вычисляется по базовому значению МК (поступившему после рассмотренной выше температурной коррекции), а затем пересчитывается более точно с учётом вычисленной скорости за счёт домножения МК на указанные корректировочные коэффициенты. Результат такой коррекции показан на рис. 15.

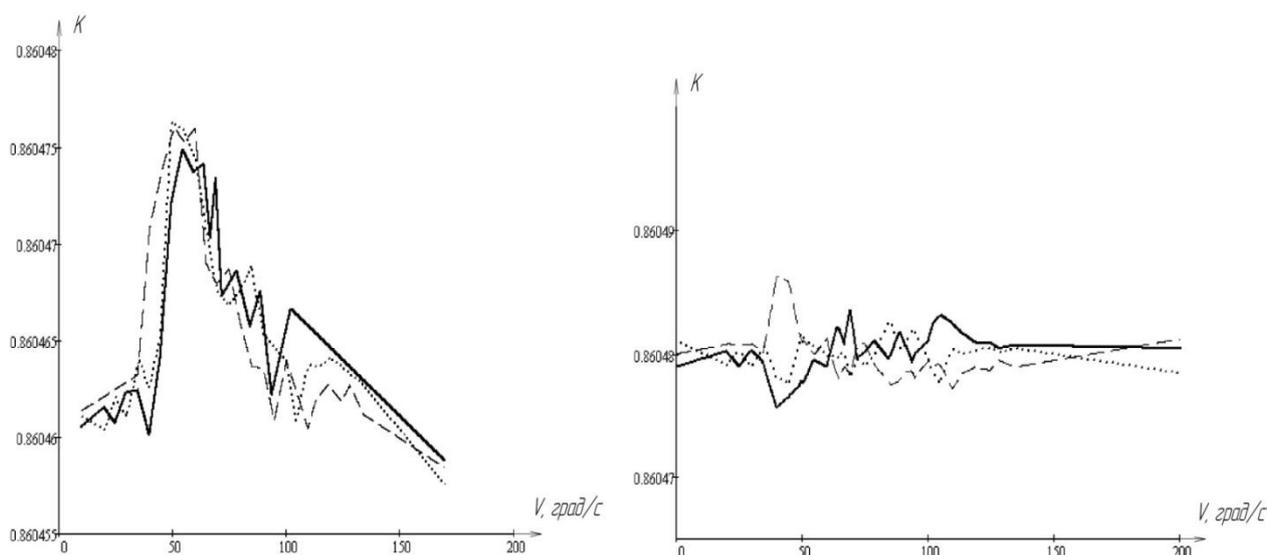


Рис. 15. Поведение масштабного коэффициента до корректировки нелинейности и после нее

Отметим, что разница между абсолютными значениями МК уменьшилась после этой корректировки в два раза. Это позволяет дополнительно по отношению к температурной коррекции уточнить определение угла поворота и скорости вращения гиromетра.

4. Способ алгоритмической коррекции масштабного коэффициента, основанный на прецизионном измерении углового положения кольцевого лазера относительно основания

Предложенные выше методы алгоритмической коррекции масштабного коэффициента лазерного гиromетра с применением функциональных зависимостей или таблиц поправочных коэффициентов предполагают использование специализированного лабораторного оборудования. Также по этой причине подстройка параметров коррекции непосредственно в процессе эксплуатации прибора может быть затруднена.

Для решения этой проблемы предлагается использовать виброподвес КЛГ в качестве поворотного устройства, а также прецизионный датчик перемещений, позволяющий определять угловое положение КЛ. Виброподвес прибора ГЛ2 совершает колебания с амплитудой 5 угл. мин., поэтому угловое положение допустимо измерять с помощью датчика перемещений. При штатных параметрах колебаний кольцевой лазер проходит нулевое положение со скоростью 0,183 м/с, что соответствует скорости вращения 105 град/с. Таким образом, кольцевой лазер поворачивается с помощью виброподвеса в каждую сторону с

переменной скоростью в диапазоне от 0 град/с до 105 град/с. Предполагается, что влияние виброподставки не исключается из выходного сигнала гиromетра. В этих условиях возможно применение рассмотренных выше методов алгоритмической коррекции.

В случае проведения температурной корректировки МК необходимо после включения прибора, через равные промежутки времени, в моменты движения КЛ в диапазоне скоростей от 15 град/с до 40 град/с выполнять набор измерений. Диапазон скоростей выбран так, чтобы с одной стороны не захватывать зону нелинейности МК (рис. 13), а с другой – выйти из зоны захвата. При измерениях регистрируются число импульсов с выхода лазерного гироскопа, величина поворота КЛ по датчику перемещений, температура КЛГ, а также напряжение нагревателя СРП. С помощью измеряемых параметров следует определить значение МК для каждого набора измерений. В процессе саморазогрева прибора на основании регистрируемых данных может быть определена зависимость, подобная изображённой на рис. 2. Далее возможно проведение алгоритмической коррекции с помощью рассмотренного выше метода.

В случае проведения корректировки МК в зависимости от скорости вращения КЛ необходимо оставить включённый прибор работать на несколько часов, а затем в диапазоне скоростей от 15 град/с до 105 град/с выполнять набор измерений. При измерениях регистрируются те же параметры, что и в предыдущем случае. В процессе измерений может быть получена зависимость, подобная показанной на рис. 14. Далее возможно проведение рассмотренной выше алгоритмической коррекции.

В качестве прецизионных датчиков перемещений может выступать ряд оптических и электронных устройств. Для выполнения указанных выше измерений максимальная погрешность такого датчика должна соответствовать погрешности выходного сигнала гиromетра, т.е. одному выходному импульсу. У прибора ГЛ2 один импульс соответствует приблизительно одной угл. сек. В случае указанного гироскопа возможно расположить датчик перемещений на плече около 10 см. В этом случае необходимая точность датчика составит не менее 0,5 мкм. Рассмотрим основные возможные варианты таких датчиков.

Для измерения перемещений в ряде случаев применяют лазерные интерферометры [5]. Точность измерения перемещений с помощью лазерного интерферометра может достигать долей мкм [6], однако их применение требует проведения тонкой юстировки, которая может быть легко нарушена при воздействии внешних факторов. Другим возможным средством измерения перемещений могут быть приборы, использующие несколько дифракционных решёток [7]. Такие датчики измерения перемещений могут иметь точность около одного мкм [8]. К недостаткам таких приборов можно отнести сложность изготовления дифракционных решёток с большим количеством полос. Прецизионным датчиком перемещений может служить также лазерный дальномер. Производители, как правило, предлагают приборы с разрешением 1 мкм и лучше [9]. Однако максимальная частота измерений остаётся невысокой (обычно 1-3 кГц), в связи с чем устройство не может быть использовано для измерения перемещений быстро движущихся объектов. Точные измерения перемещений способен выполнять датчик, в основе которого используется явление

магнитострикции. Подобные устройства позволяют проводить измерения с точностью нескольких мкм и частотой снятия отсчетов около 1 кГц [10]. Следует отметить, что для измерения линейных и угловых перемещений также используют емкостные, индуктивные, вихретоковые, ультразвуковые, магниторезистивные, потенциометрические и другие виды датчиков [11], рассмотрение которых выходит за рамки данной работы.

Заключение

Установлена приблизительно линейная тенденция к уменьшению масштабного коэффициента лазерного гиromетра с увеличением температуры, а также приблизительно гиперболическая зависимость масштабного коэффициента от напряжения на исполнительном устройстве регулировки периметра кольцевого лазера. Установлена нелинейная зависимость масштабного коэффициента от скорости вращения гиromетра. Показана алгоритмическая коррекция масштабного коэффициента, осуществляемая по экспериментальным данным. Предложен способ алгоритмической коррекции масштабного коэффициента лазерного гиromетра, основанный на прецизионном измерении углового положения кольцевого лазера, совершающего колебания с помощью виброподвеса, относительно основания.

Список литературы

1. Ароновиц Ф.В. Лазерные гироскопы. // В сб.: Применение лазеров, пер. с англ. под ред. В.П. Тычинского. М.: Мир, 1974. С. 182-269.
2. Ароновиц Ф.В. Optical gyros and their application. RTO-AG-339 – 1999.
3. Суханов С.В. Алгоритмы компенсации погрешностей выходного сигнала лазерного гироскопа. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. №3 (2). С. 134–140.
4. Енин В.Н., Людомирский М.Б., Санеев В.И. Погрешности лазерного гироскопа при различных схемах возбуждения виброподставки с «ошумлением». // Инженерный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. №12. С. 599–612. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/622102.html> (дата обращения 28.10.2014).
5. Алехин В., Мирошниченко И., Серкин А. Лазерный интерферометр для измерения перемещений. // Наноиндустрия. 2010. №2. С. 38–41.
6. Nanointek. Высокотехнологичное оборудование исследовательского и промышленного классов. Прецизионные лазерные интерферометры SIOS (Германия). Режим доступа: <http://www.nanointek.ru/index.php?id=152> (дата обращения 28.10.2014).
7. Комоцкий В., Корольков В., Соколов Ю. Оптоэлектронные дифракционные датчики малых угловых перемещений. // Фотоника. 2011. №1. С. 16–19.
8. Турухано Б.Г., Добырн В.В., Турухано Н., Кормин В.Е. Датчик линейных перемещений: пат. 2426972 Российская Федерация. 2009.

9. ГлавАвтоматика. Средства автоматизации, средства контроля и измерений (КИП), приборы промышленной безопасности. Лазерные датчики перемещения. Режим доступа: <http://www.mega-sensor.ru/Measure/mes-displ/> (дата обращения 28.10.2014).
10. Sensoren.ru. Высококачественные датчики ведущих мировых производителей. Магнитострикционные датчики линейных перемещений. Режим доступа: http://www.sensoren.ru/catalogue/magnitostrikcionnie_datchiki_lineinih_peremeschenii/ (дата обращения 28.10.2014).
11. Михайлов М. А., Манойлов В. В. Обзор методов измерения малых перемещений в приложении системы автоматического регулирования сканеров СЗМ. // Научное приборостроение. 2013. Т. 23. № 2. С. 27–37.