

Развитие методов и средств лазерной динамической гониометрии

М.Н.Бурнашев, Д.П.Лукьянов, П.А.Павлов, Ю.В.Филатов

На основе многолетних исследований, проводимых в С.-Петербургском государственном электротехническом университете (ранее – ЛЭТИ), рассматриваются методы и средства лазерной динамической гониометрии, оцениваются основные источники погрешностей и условия их минимизации. Разработанные лазерные гониометры использованы для аттестации многогранных призм, датчиков угла, оценки параметров углового движения объектов различного класса, в частности для измерения углового положения кристаллов в уникальном дифракционном спектрометре, созданном в С.-Петербургском институте ядерной физики РАН (ПИЯФ). Использование современных измерительных технологий с применением самокалибровки кольцевого лазера и накоплением больших массивов измерительной информации за короткие (1–5 мин) промежутки времени позволило достичь случайной составляющей погрешностей измерений порядка 0.02–0.03" во всем диапазоне углов от 0 до 360°. На базе использования инерциальных свойств кольцевого лазера рассмотрена концепция построения измерительных систем нового поколения для оценки сложного углового движения и динамической калибровки многоосных испытательных стендов, крупногабаритных антенных систем, телескопов и других объектов.

Ключевые слова: кольцевой лазер, угловые измерения, калибровка, преобразователь угла.

Введение

Лазерная динамическая гониометрия сформировалась в самостоятельное научное направление, которое при использовании фундаментальных свойств лазера с кольцевым резонатором привело к разработке и широкому применению прецизионных, высокоскоростных и автоматизированных систем измерения плоского угла [1–5]. Впервые предложение использовать кольцевой лазер (КЛ) в гониометре было сделано во французском патенте [1] в 1968 г. Первый лазерный динамический гониометр (ЛДГ) с погрешностью измерений порядка 0.5" был разработан во Всесоюзном НИИ метрологии им. Д.И.Менделеева (ВНИИМ) в конце 70-х гг. [2], а первый коммерческий лазерный гониометр ГС-1Л был выпущен Киевским заводом «Арсенал» в начале 80-х гг. после совместных работ с ЛЭТИ [3, 4]. Эта система используется и в настоящее время в качестве эталона угла в Метрологическом институте Словакии (Братислава) [5]. Дальнейшие исследования проводились и проводятся в основном в С.-Петербургском государственном электротехническом университете (СПбГЭТУ) [6–8].

Динамическая гониометрия, при которой КЛ совершает непрерывное вращение с постоянной угловой скоростью, открывает наиболее благоприятные условия для достижения его предельных точностных характеристик и осуществления периодической самокалибровки на естественном эталоне плоского угла 2π . В свою очередь самокалибровка требует разработки специальных средств фиксации опорных направлений, задающих эталонные значения угла. Эти средства, получившие название нуль-

индикаторов (НИ), должны обеспечивать точностные характеристики, соизмеримые с таковыми для КЛ. В наших разработках предпочтение отдается НИ на основе двухлучевого интерферометра с интегральной регистрацией интерференционной картины [3, 9]. Для достижения высокой разрешающей способности при использовании КЛ с масштабным коэффициентом порядка 10^6 необходимо применять интерполяторы, выполненные либо по схеме умножения частоты выходного сигнала КЛ, либо по схеме досчета дробной части его периода.

Измерительные технологии, которые применяются в современной лазерной динамической гониометрии, позволяют оценить ее потенциальные возможности, определяемые квантовыми флуктуациями выходного сигнала КЛ, в несколько тысячных долей угловой секунды.

1. Обобщенная схема ЛДГ

Рассмотрим основные принципы лазерной динамической гониометрии на примере гониометра, предназначенного для аттестации многогранных призм (МП). На рис.1 показан кольцевой лазер 1, установленный совместно с МП 4 на роторе 2. Его угловая скорость выбирает-

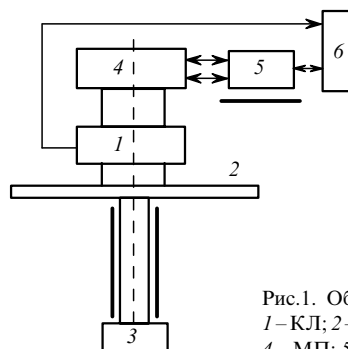


Рис.1. Обобщенная схема ЛДГ:
1 – КЛ; 2 – ротор гониометра; 3 – привод;
4 – МП; 5 – НИ; 6 – интерфейс.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Россия, 197376 С.-Петербург, ул. проф. Попова, 5

Поступила в редакцию 30 июня 1999 г.

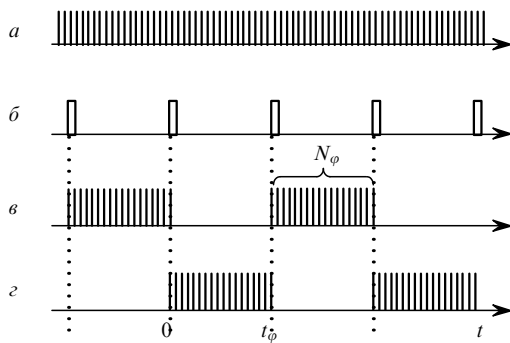


Рис.2. Характер выходных сигналов КЛ U_{RL} (а) и НИ U_{ZI} (б), а также результаты суммирования импульсов счетчиками C_1, C_2 (в, г).

ся из условия вывода рабочей точки КЛ на линейный участок выходной характеристики (вдали от зоны захвата). На неподвижном основании гониометра установлен НИ 5, формирующий параллельный световой пучок и фиксирующий моменты времени, в которые очередная грань призмы перпендикулярна пучку. Сигналы с выхода КЛ и НИ поступают через интерфейс б для дальнейшей обработки в компьютере. Они представлены на рис.2. На осциллограмме рис.2,а показаны сформированные импульсы КЛ, число которых на интервале измерения $0 - t_\varphi$ определяется выражением

$$N_\varphi = \int_0^{t_\varphi} K\Omega \cos \alpha dt = \varphi K \cos \alpha, \quad (1)$$

где $K \approx 4S/\lambda L$ – масштабный коэффициент КЛ; S и L – площадь и периметр резонатора КЛ; λ – длина волны; φ – угол поворота ротора за интервал $0 - t_\varphi$; α – угол между вектором угловой скорости Ω и измерительной осью КЛ. В дальнейшем будем полагать $\cos \alpha \approx 1$. Если в системе измерений используется интерполяция с коэффициентом интерполяции n , то в соотношении (1) масштабный коэффициент следует заменить на Kn .

На осциллограмме рис.2,б показаны импульсы НИ, число которых за оборот ротора равно числу граней призмы. Счетчики C_1 и C_2 считают число импульсов на выходе КЛ между соседними импульсами НИ по двум каналам (рис.2,в,г). Для уменьшения влияния дрейфа масштабного коэффициента КЛ предусмотрена самокалибровка за полный оборот (на естественном эталоне плоского угла 2π)

$$N_{2\pi} = \int_0^T K\Omega dt = 2\pi K, \quad (2)$$

где T – время одного оборота. Используя соотношения (1) и (2), получим результат измерения угла в виде

$$\varphi = 2\pi \frac{N_\varphi}{N_{2\pi}}. \quad (3)$$

2. Корреляционный анализ случайных погрешностей измерения

Используя выражения (1) и (2), представим суммирование импульсов КЛ (1), (2) в виде

$$N(t) = N^0(t) + \delta N(t),$$

где $N^0(t)$ – линейная функция времени; $\delta N(t)$ – нестационарный случайный процесс, характеризующий погрешность измерений. Функцию $\delta N(t)$ можно разбить на две

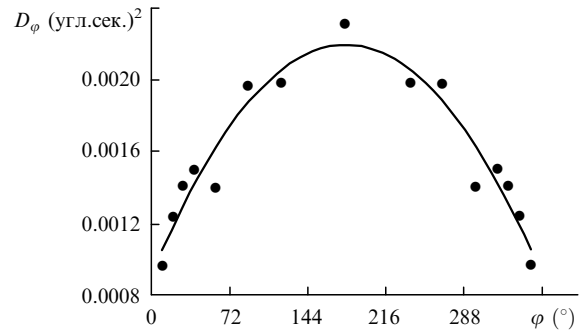


Рис.3. Оценка погрешности ЛДГ как функции измеряемого угла, рассчитанная по выражению (6) (точки – результаты эксперимента).

составляющие. Первая обусловлена вкладом широкополосных флуктуаций $\delta\omega(t)$ частоты выходного сигнала КЛ и может быть записана в виде

$$\delta N^\omega(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^t \delta\omega(t') dt'. \quad (4)$$

Вторая составляющая определяется погрешностями НИ, вызывающими вариации пределов интегрирования сигнала КЛ:

$$\begin{aligned} \delta N^t(t) &= K \left[\int_t^{t+\delta t(t)} \Omega(t') dt' - \int_0^{\delta t(0)} \Omega(t') dt' \right] \\ &= \frac{N_{2\pi}}{2\pi} [\Omega(t)\delta t(t) - \Omega(0)\delta t(0)]. \end{aligned} \quad (5)$$

В результате найдем $\delta N(t)$ как сумму:

$$\delta N(t) = \delta N^\omega(t) + \delta N^t(t).$$

Опуская промежуточные вычисления погрешностей измерения угла через корреляционные функции $R_N^\omega(t_1, t_2)$ и $R_N^t(t_1, t_2)$ случайных процессов $\delta N^\omega(t)$ и $\delta N^t(t)$ и принимая модель флуктуаций частоты выходного сигнала КЛ в виде белого шума, приведем на основании работы [10] окончательное выражение для случайной погрешности измерения угла (рис.3):

$$D_\varphi(\varphi) = \begin{cases} 2D_\varphi^t + (r_w^2 T - 2D_\varphi^t) \frac{\varphi}{2\pi} \left(1 - \frac{\varphi}{2\pi}\right), & \varphi \neq 0, 2\pi, \\ D_\varphi(\varphi) = 0, & \varphi = 0, 2\pi, \end{cases} \quad (6)$$

где $D_\varphi^t = (2\pi/T)^2 D^t = 0.0009$ (угл.сек.)²; D^t – дисперсия моментов фиксации границ угла; $r_w^2 T - 2D_\varphi^t = 0.0013$ (угл.сек.)²; $r_w = 0.05''/c^{1/2}$ – коэффициент случайного дрейфа КЛ.

Из приведенных результатов видно, что максимальная дисперсия не превышает 0.0024 (угл.сек.)², т. е. $\sigma < 0.05''$. Дальнейшее уменьшение погрешности в ЛДГ осуществляется накоплением и статистической обработкой больших массивов измерений, которые легко обрабатываются в динамическом режиме.

3. Калибровка преобразователей угла

Калибровка дискретных преобразователей угла, таких как фотоэлектрические преобразователи, магнитные преобразователи, индуктосины и т. п., а также угловых мер (многогранные призмы, лимбы и др.) являлась основной задачей, для решения которой разрабатывались

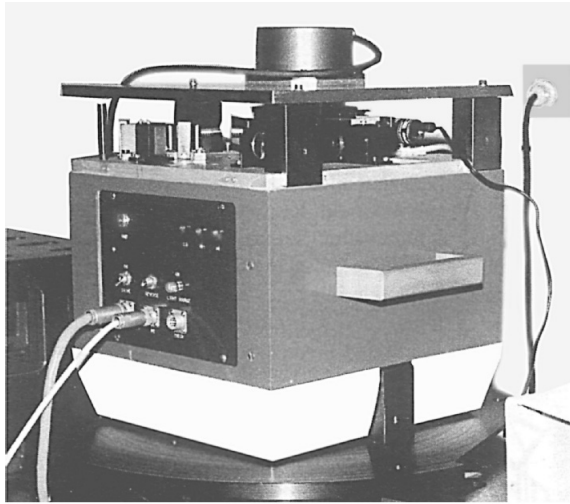


Рис.4. Общий вид лазерного гониометра ИУП-1Л. На верхней плите прибора расположен фотоэлектрический преобразователь угла RON255, подготовленный для калибровки.

первые ЛДГ. Рассмотрим гониометр такого назначения на примере прибора ИУП-1Л, разработанного в СПбГЭТУ и предназначенного для прецизионной калибровки преобразователей угла различных типов, бесконтактного измерения углового положения «внешнего» объекта и измерения угловой скорости движения «внешнего» объекта. Разработанный прибор прошел детальные метрологические испытания в Германском физико-техническом ведомстве (РТВ, Брауншвейг), а также исследовался при проведении сличений с эталонными средствами ВНИИМ [7].

Блок-схема ИУП-1Л представлена на рис.1, а общий вид прибора – на фотографии (рис.4). В качестве кольцевого лазера в ИУП-1Л используются, как правило, приборы КМ-11 (НИИ «Полус») и ГЛ-1 (НПК «Электрооптика») [10, 11]. Кольцевой лазер на $\lambda = 0.63$ мкм представляет собой ситалловый квадратный моноблок с периметром 44 см и призмными отражателями. Активная He–Ne-среда возбуждается низковольтным высокочастотным разрядом. Масштабный коэффициент КЛ составляет $\sim 1.3''/\text{имп.}$, что соответствует примерно одному миллиону импульсов на оборот. Для увеличения разрешающей способности в гониометре используется множитель частоты выходного сигнала КЛ с коэффициентом умножения 10. Кольцевой лазер в составе ЛДГ установлен на роторе, вращающемся со скоростью порядка 0.7 об./с при нестабильности 0.5 %.

4. Калибровка многогранных призм

Для калибровки МП в состав гониометра ИУП-1Л введен интерференционный НИ [3, 9], обеспечивающий привязку к граням призм в процессе измерения. Снижение случайной погрешности измерений при калибровке МП обеспечивается обычно вращением ротора гониометра в течение 50–100 оборотов (полное время измерения 0.5–1.5 мин). Проведение серии таких измерений показывает, что среднеквадратичное отклонение результата каждого измерения от среднего по всей серии составляет 0.02–0.03''. Одним из источников систематической погрешности при калибровке МП является ее наклон относительно оси вращения гониометра при наклоне НИ вокруг его оптической оси.

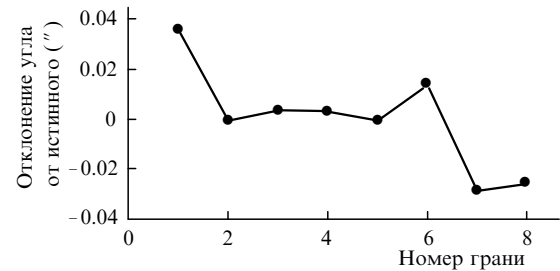


Рис.5. Сравнение результатов калибровки 8-гранной призмы с данными ее аттестации на эталонной установке.

Для исключения погрешности обычно используется кросс-калибровка [12], которая включает n циклов измерений (по числу граней МП). После каждого цикла призма поворачивается на угол $360^\circ/n$ относительно ротора гониометра и проводится новый цикл измерений. Результаты калибровки n углов МП находятся с помощью обработки матрицы $n \times n$ измерений.

В качестве примера использования гониометра ИУП-1Л приведем результаты, полученные при калибровке 8-гранной эталонной призмы, аттестованной во ВНИИМ [7] (рис.5). Видно, что разность углов, полученных при сравнении результатов калибровки с помощью ИУП-1Л с данными аттестации призмы на эталонной установке, не превышает 0.04''.

5. Калибровка фотоэлектрических преобразователей угла

В этом случае калибруемый фотоэлектрический преобразователь (ФЭП) угла устанавливается на специальной платформе гониометра таким образом, чтобы его ось вращения была совмещена с осью вращения ротора гониометра. Если нет необходимости в калибровке всех меток ФЭП, то производится деление частоты его выходного сигнала с коэффициентом деления, обеспечивающим необходимую дискретность калибруемых угловых интервалов. С помощью ИУП-1Л производилась калибровка различных ФЭП фирмы Heidenhain (RON255, RON905 и др.), голографических преобразователей, разработанных в ПИЯФ, опытных образцов кодовых ФЭП, выпускаемых АО «Авангард», и ряда других.

При калибровке серийного инкрементного ФЭП RON255 для 12° -ных интервалов было сделано 25 измерений, каждое из которых проводилось в течение 25 оборотов ротора гониометра. На рис.6 представлены отклонения результатов, полученных в одном из измерений, от среднего по всей серии. Усредненное по всем измерениям

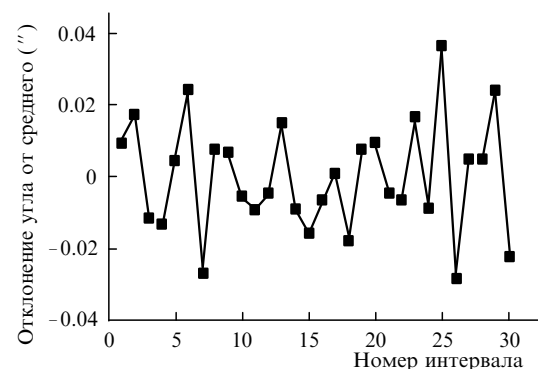


Рис.6. Отклонения результатов измерений от среднего по серии при калибровке прибора RON255.

серии среднеквадратичное отклонение составляет $0.019''$ и характеризует воспроизводимость результатов измерений, получаемых при калибровке с помощью ИУП-1Л ФЭП угла. Среднее по всем измерениям среднеквадратичное отклонение для накопленной погрешности составило менее $0.03''$.

6. Обращенный лазерный гониометр

Обращенный лазерный гониометр (ОЛГ) позволяет измерять угловое положение объектов различного типа: испытательных стендов, установок для нанесения штриховых мер, столов, используемых в физических экспериментах, и т. д. В этой схеме ротор гониометра располагается соосно с объектом, осуществляющим угловое перемещение (рис.7). На роторе гониометра 1 кроме КЛ 2 устанавливается НИ 4. На объекте устанавливается контролируемое зеркало 5, угловое положение которого относительно опорного зеркала 3, находящегося на неподвижном основании, измеряется гониометром. НИ, вращающийся вместе с ротором гониометра, вырабатывает импульсы в те моменты времени, когда его оптическая ось совпадает с нормальными к зеркалам 3 и 5. Как и в традиционной схеме гониометра, в ОЛГ интервалы между импульсами НИ заполняются выходным сигналом КЛ, в результате чего происходит измерение углового положения стола по отношению к опорному направлению. Диапазон измерений составляет при этом 360° , а точность измерений находится на уровне, в целом характерном для лазерной гониометрии.

ОЛГ использовался в составе двухкристального дифракционного спектрометра, разработанного в ПИЯФ [8]. Для этого были созданы два образца, каждый из которых соответствовал схеме, представленной на рис.7. Объектом измерений в данном случае являлся поворотный стол спектрометра с расположенным на нем кристаллом. Исследования интенсивности линии $K_{\alpha 1}$ Мо рентгеновского излучения ($E = 17.47334$ кэВ, $\lambda = 71$ Å) показали, что случайная погрешность угловых измерений составляет около $0.05''$.

7. Бесконтактное измерение углового положения «внешнего» объекта

Существует целый ряд задач углоизмерительной техники, требующих измерения углового положения объектов, которые находятся на некотором (иногда достаточно большом) расстоянии от измерительного устройства.

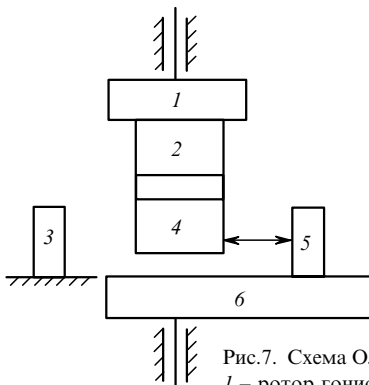


Рис.7. Схема ОЛГ:
1 – ротор гониометра; 2 – КЛ; 3 – опорное зеркало; 4 – НИ; 5 – контролируемое зеркало; 6 – объект измерения.

Такие задачи обычно решаются с помощью автоколлиматоров или теодолитов. Обладая достаточно низкой погрешностью (менее $0.1''$), они обеспечивают ее в весьма малом угловом диапазоне (угловые минуты). Модифицированная схема ЛДГ позволяет решать такие задачи с высокой точностью в диапазоне углов до $20-30^\circ$ [7, 14].

В данном случае МП используется для пространственного сканирования светового пучка НИ. На основании гониометра устанавливается опорное зеркало, а контролируемое зеркало закрепляется на объекте измерения. НИ вырабатывает импульсы в те моменты времени, когда его световой пучок, сканируемый МП, падает нормально на опорное и контролируемое зеркала. Частота измерения углового положения контролируемого объекта f определяется произведением скорости вращения Ω на число граней МП n : $f = n\Omega/2\pi$. Для больших удалений L контролируемого зеркала от ЛДГ диапазон угловых измерений $\Delta\varphi_{\max}$ определяется в основном размером D контролируемого зеркала и составляет $2 \arctan(D/2L)$. Так, при диаметре зеркала $D = 100$ мм и $L = 0.5$ м диапазон измерений превышает 11° .

Точностные характеристики ИУП-1Л в данном режиме работы исследовались с использованием эталонного поворотного стола, разработанного в РТВ (Германия) [7], который обеспечивает угловое позиционирование с погрешностью $0.1''$ (1σ). Исследования проводились при последовательных поворотах стола на 1° с остановами и измерениями углового положения стола относительно контрольного зеркала 4 с помощью ИУП-1Л. Полученные результаты показали, что шаговая погрешность не превышает $0.2''$, а накопленная – $0,35''$ во всем диапазоне измерений, составлявшем 24° .

ЛДГ успешно использовался для оценки угловой скорости движения различных объектов. Так, в 1990-92 гг. производилась оценка точности прецизионной роторной установки, позволяющей воспроизводить угловые скорости в диапазоне $6 \cdot 10^{-5} - 6$ рад/с [15]. Использование в ЛДГ 72-гранной МП, вращающейся с частотой ~ 0.8 Гц, позволило получить частоту опроса около 58 Гц. При измерениях инфранизких скоростей ($10^{-2} - 10^{-3}$ рад/с) с усреднением по 1440 точкам погрешность измерения угловой скорости составила $1.2 \cdot 10^{-6}$ рад/с.

В 1993 г. в Институте управления полетом (DLR, Брауншвейг, Германия) проводилась оценка погрешности индуктосина трехосного стенда фирмы Acutronic с помощью гониометра ИУП-1Л, установленного на расстоянии 1.7 м от контролируемого отражателя.

8. Концепция построения ЛДГ нового поколения, используемых для оценки параметров сложного углового движения объектов

Рассмотренные ранее архитектуры построения ЛДГ были предназначены для работы на неподвижном основании и использовали КЛ в качестве высокоразрешающего датчика угла. При этом одно из фундаментальных свойств КЛ – чувствительность к абсолютной угловой скорости – не было востребовано. Вместе с тем новые промышленные технологии выдвигают задачу прецизионной высокоскоростной оценки сложного углового движения самых разнообразных объектов, к числу которых можно отнести многоосные поверочные стенды, большие следящие антенные системы, оптические телескопы,

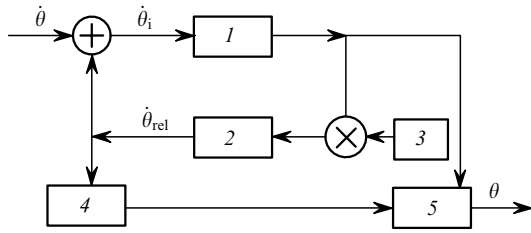


Рис.8. Функциональная схема ИЛГ: 1 – КЛ; 2 – привод; 3 – опорный генератор; 4 – ОДУ; 5 – интерфейс.

уникальные роторные установки и т. п.

Для их проверки и аттестации необходимо устанавливать измерительные системы непосредственно на исследуемые объекты, т. е. в широком динамическом диапазоне измерять углы, угловые скорости и ускорения на подвижном основании. Это требует перехода к принципиально новому методу лазерной динамической гониометрии, в котором инерциальные свойства КЛ выходят на первый план.

Концепцию данного метода можно свести к формированию на базе вращающегося КЛ инерциальной системы координат, относительно которой определяется сложное угловое движение основания. Функциональная схема инерциального лазерного гониометра (ИЛГ) представлена на рис.8. Здесь ротор ИЛГ совместно с КЛ 1 вращается с постоянной угловой скоростью в инерциальном пространстве. В состав гониометра введен оптический датчик угла (ОДУ) 4, позволяющий определять угловые перемещения ротора ИЛГ относительно его статора. Укрепленные на роторе КЛ 1 и ОДУ 4 измеряют различные угловые величины – угловое положение ротора относительно инерциального пространства $\theta_i(t)$ и угловое положение ротора относительно статора $\theta_{rel}(t)$ соответственно.

Если обозначить через $\theta(t)$ угловое положение основания, совершающего сложное угловое движение, то для угловых скоростей можно записать

$$\dot{\theta}_i(t) = \dot{\theta}(t) + \dot{\theta}_{rel}(t).$$

Фазовая система стабилизации 2 управляет движением ротора путем сравнения сигнала КЛ 1 с сигналом опор-

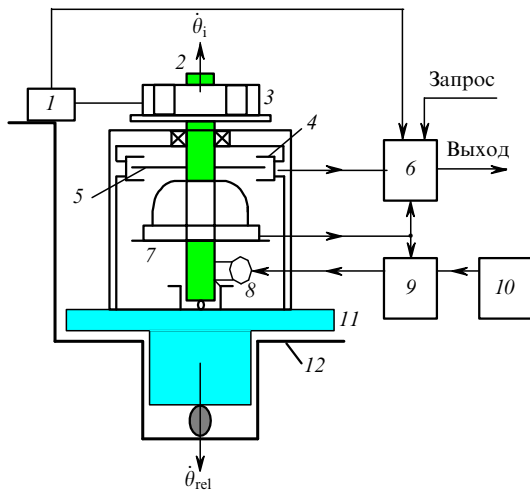


Рис.9. Кинематическая схема ИЛГ: 1 – НИ; 2 – ротор; 3 – МП; 4 – статор ОДУ; 5 – ротор ОДУ; 6 – интерфейс; 7 – КЛ; 8 – привод; 9 – система стабилизации скорости вращения; 10 – генератор опорной частоты; 11 – поворотная платформа; 12 – неподвижный фундамент.

ного генератора 3, работающего на частоте ω_0 . Это обеспечивает вращение ротора ИЛГ в инерциальном пространстве с квазипостоянной угловой скоростью, при которой частота выходного сигнала КЛ меняется крайне незначительно. Из приведенного выше соотношения текущее угловое положение основания может быть найдено в виде

$$\theta(t) = \theta_i(t) - \theta_{rel}(t).$$

Кинематическая схема ИЛГ показана на рис.9. В схему ИЛГ введены НИ 1 и МП 2 для обеспечения калибровки масштабного коэффициента КЛ.

9. Характеристика информативных сигналов ИЛГ

В соответствии с концепцией ИЛГ кольцевой лазер вращается в инерциальном пространстве с почти постоянной угловой скоростью и его выходной сигнал представляет собой гармоническое колебание с квазипостоянной частотой. В этом случае определение динамических параметров движения объекта почти полностью выполняется ОДУ. Его выходной сигнал изменяется в широком динамическом диапазоне, задаваемом характером движения объекта. В связи с этим представляется необходимым рассмотреть параметры сигнала ОДУ более подробно. Сигнал ОДУ может быть разложен в ряд Фурье по гармоническим составляющим, поэтому достаточно рассмотреть отклик датчика на гармоническое воздействие вида

$$\Theta_{rel} = \omega_0 t + \theta_m \sin(\Omega t + \Psi_m) + \theta_0,$$

где ω_0 – угловая скорость «гладкого» вращения ротора, задаваемая опорным генератором сервопривода; θ_m, Ω, Ψ_m – амплитуда, частота и начальная фаза угловых колебаний объекта; θ_0 – начальное угловое положение объекта.

При коэффициенте передачи ОДУ $k = N$, где N – число меток датчика за один оборот, на выходе фотоприемника получим сигнал в виде

$$U(t) = U_0 \sin k[\omega_0 t + \theta_m (\sin \Omega t + \Psi_m) + \theta_0],$$

представляющий собой колебание, модулированное по фазе гармонической функцией. Его спектр может быть представлен в виде разложения в бесконечный ряд по функциям Бесселя [16]:

$$U(t) = U_0 \sum_{-\infty}^{\infty} J_n(k\theta_m) \cos[(k\omega_0 + n\Omega)t + n\Psi_m + k\varphi_0].$$

Стремление использовать ОДУ с высоким разрешением, например голографический преобразователь угловых перемещений ПКГ-105М с коэффициентом $k = 3.24 \times 10^5$, приводит, как следует из соотношения, к резкому

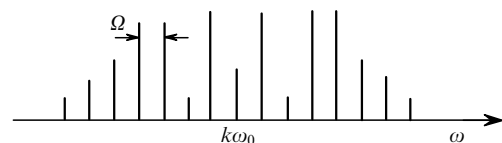


Рис.10. Спектр модулированного по фазе сигнала ОДУ при $k\theta_m = 5$.

увеличению девиации фазы $k\theta_m$, что, в свою очередь, обуславливает расширение спектра сигнала на выходе фотоприемника. На рис.10 показан спектр сигнала при $k\theta_m = 5$. Полоса частот, занимаемая выходным сигналом ОДУ, может быть оценена из выражения

$$\Delta\omega \approx 2 \left[1 + k(\theta_m \ddot{\theta}_m)^{1/2} \right]. \quad (7)$$

Для примера оценим полосу частот Δf на выходе датчика угла при следующих исходных данных, характерных для трехосных испытательных стендов: $\theta_m = 120^\circ$, $\dot{\theta}_m = 2500^\circ/c^2$. Подставив эти значения в (7), получим $\Delta f = \Delta\omega/2\pi \approx 1$ МГц при частоте модуляции $F = \Omega/2\pi \approx 0.73$ Гц. Приведенные Δf и Ω свидетельствуют о том, что в полосе частот, занимаемой выходным сигналом ОДУ, помещается $\Delta f/F \cdot 1.4 \cdot 10^6$ дискретных компонент, что приближает рассматриваемый линейчатый спектр к квазипрерывному. Для его неискаженного воспроизведения полоса пропускания следующего за фотодетектором сквозного тракта должна удовлетворять условию $f_{\text{ср}} > f$, при котором минимизируются амплитудные и фазовые искажения.

Сложный характер углового движения испытательных стендов требует оценки не только амплитудных искажений выходного сигнала, но и его временных задержек, обусловленных фазочастотной характеристикой. Комплексный анализ динамических погрешностей, которые вносят КЛ, оптический датчик и нуль-индикатор, дает для результирующей погрешности ИЛГ оценку $\pm 0.19''$ в диапазоне угловых скоростей до $200^\circ/c$ при ускорениях до $2500^\circ/c^2$ и рабочих частотах до 100 Гц. Детерминированный характер динамических погрешностей дает возможность их снижения аппаратными и алгоритмическими методами.

Заключение

Методы и средства лазерной динамической гониометрии вышли далеко за рамки лабораторных исследований и органически дополнили традиционные углоизмерительные технологии благодаря высокому быстродействию, неограниченному диапазону угловых измерений, высоким точностным характеристикам и т. д. Достигнутые в настоящее время погрешности ЛДГ порядка $0.02 - 0.03''$ были получены на образцах КЛ средней точности с призмами полного внутреннего отражения.

Дальнейшее повышение точности ЛДГ возможно при переходе к более перспективным оптико-физическим схемам КЛ с многослойными диэлектрическими зеркалами, потери в которых могут быть доведены до $(2-4) \cdot 10^{-6}$. Соединение таких КЛ с высокоразрешающими голографическими датчиками угла позволяет создать новый государственный эталон плоского угла, над разработ-

кой которого в настоящее время работают коллективы СПбГГЭТУ, ВНИИМ, ПИЯФ и др.

Наконец, возникшая в последние годы необходимость оценки параметров сложного углового движения привела к принципиально новой архитектуре ЛДГ, где оказались востребованными не только высокие точностные характеристики кольцевых лазеров, но и их инерциальные свойства. Это позволяет говорить о возникновении нового направления – инерциальной лазерной гониометрии.

1. Catherin J.M., Dessus B. *French Patent 1511089* (granted 26.01.68).
2. Блантер В.Е., Филатов Ю.В. *Метрология*, № 1, 3 (1979).
3. Батраков А.С., Бутусов М.М., Лукьянов Д.П. и др. *Лазерные измерительные системы* (М., Радио и связь, 1981).
4. Ванюрихин А.И., Зайцев И.И. *Опт.-мех. пром.*, № 9, 28 (1982).
5. Mokros J., Vu K.X. *Jemna Mechanica a Optika*, 9, 203 (1993).
6. Loukianov D.P., Pavlov P.A., Filatov Yu.V. *Symposium Gyro Technology* (Germany, Stuttgart, 1991).
7. Filatov Yu.V., Loukianov D.P., Probst R. *Metrologia*, 34, 343 (1997).
8. Bournachev M.N., Kirianov K.E., Loukianov D.P., Mezentsev A.A., Filatov Yu.V., Pavlov P.A. *Meas. Sci. Technol.*, 9, 1067 (1998).
9. Филатов Ю.В. *Опт.-мех. пром.*, № 4, 13 (1989).
10. Filatov Yu.V., Loukianov D.P., Pavlov P.A., Burnaschov M.N. In: *Optical Gyros and their Application* (Neuilly-sur-Seine, France, RTO AGARDograph, 339, 1999).
11. Курятов В.Н. *Труды II Междун. конф. по инерциальной навигации* (С.-Петербург, 1995).
12. Sim P.J. In: *Modern Techniques in Metrology* (Singapore, World Scientific, 1984, p.102).
13. Probst R. *VDI Reports*, № 1118, 173 (1994).
14. Filatov Yu.V., Loukianov D.P., Pavlov P.A. *VDI Reports*, № 1118, 123 (1994).
15. Асаулenco П.А., Шахматов А.Ф. *Труды ЛГТУ*, № 437, 35 (1992).
16. Картьяну Г. *Частотная модуляция* (Бухарест, Изд. АН Румынской народной республики, 1961).

M.N.Burnashev, D.P.Luk'yanov, P.A.Pavlov, Yu.V.Filatov. **New methods and means of dynamic laser goniometry.**

The methods and means of dynamic laser goniometry developed over many years of research carried out in the St Petersburg Electrotechnical University (former Leningrad Electrotechnical Institute (LETI)) are considered. The primary sources of error and conditions for error minimisation are identified and evaluated. The developed laser goniometers have been used to certify optical polygons and angular position sensors, estimate angular motion parameters of various objects, and specifically to measure angular positions of crystals in the unique diffraction spectrometer built at the St Petersburg Institute of Nuclear Physics of the Russian Academy of Sciences. Modern measurement technologies combined with a selfcalibrated ring laser allowed a large amount of measuring information to be accumulated over a short (1 to 5 min) period of time and secured the random component of angle measurement uncertainty as small as 0.02 to 0.03 in the 0–360 range. On the basis of inertial properties of a ring laser, a new concept was proposed for constructing a new generation of measuring systems intended to estimate complex angular motions and provide dynamic calibration of multiple-axis test tables, large-scale antenna systems, telescopes and other objects.