

цированный конвейерный алгоритм опроса сети, существенно уменьшающий длительность цикла опроса и повышающий экономичность сети вследствие снижения времени нахождения ее узлов в активном рабочем состоянии. Приведены аналитические выражения длительности цикла опроса, доли времени нахождения узлов сети в активном рабочем состоянии, показателей эффективности БСС с прямоугольной решетчатой структурой и модифицированный конвейерный алгоритм циклического равномерного опроса, которые найдут применение при проектировании ИИС и систем автоматического управления.

Л и т е р а т у р а

1. **Нейджел Д. Дж.** Беспроводные сети интеллектуальных датчиков // Датчики и системы. 2002. № 6. С. 51—58.
2. **Макаров В. В., Володин С. М.** Алгоритм конвейерного циклического опроса беспроводной сенсорной сети // Датчики и системы. 2014. № 2. С. 16—20.
3. **Аникин А. П.** Обзор современных технологий беспроводной передачи данных // Беспроводные технологии. 2011. № 4. С. 6—12.

Дата принятия 05.06.2015 г.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.786.3

Особенности метода кросс-калибровки в лазерной гониометрии

П. А. ПАВЛОВ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
им. В. И. Ульянова (Ленина), Россия, e-mail: pavl-petr@yandex.ru

Рассмотрена упрощенная процедура кросс-калибровки, используемая в лазерном динамическом гониометре, когда шаг углового перемещения исследуемого датчика угла превышает его дискретность. Полученная методическая погрешность при M равномерных угловых перемещениях датчика угла определяется суммарной амплитудой M -й гармоники и кратных ей гармоник систематической погрешности гониометра. Экспериментально доказано, что при шаге угловых перемещений датчика угла менее 120° методическая погрешность не превышает $0,01''$.

Ключевые слова: датчик угла, лазерный динамический гониометр, кросс-калибровка.

A simplified cross-calibration procedure used in a dynamic laser goniometer, when the angular displacement step of the studied angle sensor exceeds its discreteness are considered. It is shown that the methodical error of this procedure with M angular displacement steps of the angle sensor is determined by the total amplitude of M -harmonic and by multiples of harmonics of the dynamic laser goniometer systematic error. It is proved experimentally that when the angular displacement step of the angle sensor is less than 120° the methodical error does not exceed $0,01''$.

Key words: angle sensor, laser dynamic goniometer, cross-calibration.

Метод кросс-калибровки используют в угловых измерениях для исследования метрологических характеристик датчиков угла (ДУ) [1, 2]. С помощью данного метода можно определить систематические погрешности двух ДУ, участвующих в измерениях, без привлечения дополнительных средств. Метод предполагает последовательность угловых перемещений испытуемого ДУ относительно другого на углы, определяемые дискретностью датчика с учетом, что систематическая погрешность при угловом перемещении на угол 2π равна нулю. В результате измерений получают массив данных размером $P \times P$, где P — число угловых перемещений. Для призм с небольшим числом граней измерения углов занимают ограниченное время, и процесс вычисле-

ний не представляет особых проблем. Однако, если у испытуемых ДУ дискретность составляет десятки угловых секунд, то метод кросс-калибровки применить затруднительно.

В статье рассмотрена особенность указанного метода применительно к лазерной гониометрии, где в качестве ДУ используют вращающийся с квазипостоянной скоростью кольцевой лазер (КЛ) [3]. Исследуемый ДУ устанавливают на вал лазерного динамического гониометра (ЛДГ). Измерения начинают с первого штриха ДУ после прохождения сигнала нулевой метки ЛДГ. В процессе кросс-калибровки измерения повторяют после каждого перемещения датчика относительно КЛ на угол, определяемый дискретностью ДУ.

Результат измерений в k -м положении гониометра запишем в виде

$$\varphi_{i+k} = 2\pi i / P + (b_{i+k} - b_k) + (a_{1+i} - a_1),$$

где φ_{i+k} — угол между i -м и первым штрихом ДУ в положении k ; i — номер измерения в каждом положении ДУ, $i = 1, 2, \dots, P$; P , k — количество штрихов и номер углового перемещения ДУ, $k = 1, 2, \dots, P$; b_k , b_{i+k} — систематические погрешности k -го штриха и i -го в положении k ; a_{1+i} , a_1 — систематические погрешности ЛДГ при i -м и начальном отсчетах по шкале КЛ.

Систематическая погрешность результата измерений содержит комбинацию погрешностей ЛДГ и ДУ:

$$\Delta_{ik} = \varphi_{i+k} - 2\pi i / P = (b_{i+k} - b_k) + (a_{1+i} - a_1). \quad (1)$$

При этом выполняются соотношения, отражающие тот факт, что $\Delta_{ik} = 0$ при повороте на угол 2π :

$$\sum_{i=1}^P b_i = 0; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^P a_i = 0. \quad (3)$$

При кросс-калибровке результатом измерений является матрица погрешностей Δ^* размером $P \times P$, элементы которой определены формулой (1). Если при угловом перемещении датчика на угол $2\pi k/P$ относительно его первоначального положения $(k + i) > P$, то при вычислениях необходимо провести замену $k + i$ на l , где $l = (k + i) - P$. После необходимых вычислений — усреднения по столбцам матрицы погрешностей с учетом соотношений (2), (3) и вычитания среднего из строк в каждом столбце — находим

$$b_{i+k} + a_{i+1} = \Delta_{ik} - \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \Delta_{ik}.$$

Систематические погрешности ЛДГ определяем усреднением по строкам матрицы погрешностей:

$$a_{i+1} = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P \left(\Delta_{ik} - \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \Delta_{ik} \right). \quad (4)$$

Для вычисления систематической погрешности ДУ необходимо транспонировать матрицу погрешностей Δ^* и провести указанные выше вычисления. В результате погрешность находим из выражения

$$-b_i = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \left(\Delta_{ki} - \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P \Delta_{ki} \right). \quad (5)$$

Формулы (4), (5) отличаются от аналогичных выражений, представленных в [2], где не учтены погрешности начальных отсчетов a_1 , b_1 .

Когда шаг углового перемещения ДУ превышает его дискретность, матрица погрешностей Δ^* имеет размер $P \times M$, где M — число угловых перемещений. В этом случае выражения (4), (5) неверны, так как не выполнены условия (2), (3).

Для этого случая рассмотрим процедуру упрощенной кросс-калибровки. Пусть осуществляется M равномерных угловых перемещений ДУ относительно КЛ. При этом отношение числа измеряемых углов кратно числу угловых перемещений ($P/M = q$, где q — целое число). Результат измерений можно записать в виде матрицы погрешностей с элементами

$$\Delta_{im}^* = (b_{i+j} - b_j) + (a_{i+1} - a_1), \quad j = 1 + q(m-1), \\ m = 1, 2, \dots, M, i = 1, 2, \dots, P.$$

Процедура вычислений погрешности ДУ следующая.

1. Усреднение по столбцам в матрице погрешностей Δ^* :

$$\frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \Delta_{im}^* = -b_m - a_1.$$

2. Вычитание среднего из строк в каждом столбце:

$$\Delta_{im}^* - \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \Delta_{im}^* = b_{i+j} + a_{i+1}.$$

3. Формирование новой матрицы погрешностей $\hat{\Delta}^*$ сдвигом вниз строк в столбцах, начиная со второго, таким образом, что строка с номером i становится строкой с номером $i + q(m-1)$. После преобразования первая строка каждого столбца матрицы $\hat{\Delta}^*$ будет содержать погрешность датчика b_2 , вторая строка — погрешность b_3 и т. д.

4. Усреднение по строкам матрицы погрешностей $\hat{\Delta}^*$:

$$b_{i+1} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \hat{\Delta}_{im}^* - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M a_{i+j}. \quad (6)$$

В общем случае систематическая погрешность ЛДГ неизвестна, поэтому систематическую погрешность ДУ можно вычислить как

$$b_{i+1} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \hat{\Delta}_{im}^*. \quad (7)$$

Выражение (7) является базовым в упрощенной процедуре кросс-калибровки, его использование приводит к появлению методической погрешности при оценке систематической погрешности ДУ, определяемой вторым слагаемым в правой части выражения (6). Для оценки этого слагаемого разложим систематическую погрешность ЛДГ в ряд Фурье на интервале $0-2\pi$:

$$a_g = \sum_{i=0}^{N-1} F_i^{\text{ЛДГ}} \exp(2\pi g i / N),$$

где N — число гармоник; $g = i+j$.

Угловые перемещения при кросс-калибровке не меняют спектр систематической погрешности ЛДГ, но изменяют ее фазу. Используя теорему о сдвиге [4], запишем $F_{mi}^{\text{ЛДГ}} = F_i^{\text{ЛДГ}} \exp(-2\pi m i / M)$. Следовательно, при угловом перемещении на угол $2\pi m / M$ амплитуда i -й гармоники равна амплитуде в начальном положении, а фаза отличается на $2\pi m / M$ рад. Находим усредненную i -ю фурье-гармонику систематической погрешности ЛДГ по результатам, получен-

ным в M положениях: $\bar{F}_i^{\text{ЛДГ}} = \frac{1}{M} F_{i1}^{\text{ЛДГ}} \sum_{m=1}^M \exp(-2\pi m i / M)$.

Правая часть этой формулы равна нулю для всех, кроме кратных M , гармоник. Для вычисления амплитуды M -й гармоники проводят другую серию измерений с угловыми перемещениями на величину $2\pi m / M_1$ при условии, что M и M_1 некрatны.

Итак, методическая погрешность упрощенной процедуры кросс-калибровки при равномерных перемещениях ДУ на углы $2\pi m / M$ определяется суммой M -й и кратных ей гармоник систематической погрешности ЛДГ.

Для нахождения систематической погрешности ЛДГ необходимо: из каждой строки матрицы ошибок $\hat{\Delta}^*$ вычесть соответствующую погрешность ДУ; осуществить сдвиг строк в каждом столбце матрицы $\hat{\Delta}^*$, обратный сдвигу, проведенному в процедуре вычислений погрешности ДУ; выполнить усреднение по строкам.

Рассмотрим результаты упрощенной процедуры кросс-калибровки, осуществленной на ЛДГ при измерении углов 8-гранной оптической призмы (ОП) и оптического датчика угла (ОДУ). Измерения ОП проводили на каждой грани с шагом перемещения 45° . Углы вычисляли с помощью алгоритмов фазовременного метода [5]. Случайная погрешность результата измерений составила менее $0,01''$. Систематические погрешности ОП и ЛДГ определяли по (4), (5). Отметим, что систематическая погрешность ЛДГ при измерении углов ОП в основном определяется погрешностями КЛ и интерференционного нуля-индикатора [6, 7].

Спектр систематической погрешности ЛДГ следующий: первой гармонике соответствует амплитуда $0,127''$, второй — $0,021''$, третьей — $0,003''$, четвертой — $0,008''$. Следовательно, основной гармоникой является первая. Таким образом, можно ожидать, что при упрощенной кросс-калибровке при угловом перемещении ОП на 180° методическая погрешность составит около $0,02''$, а при угловом перемещении на 90° — $0,01''$.

На рис. 1 (кривые 1, 2) представлен график методической погрешности упрощенной процедуры кросс-калибровки δ_m , найденной как отличие результатов по 2-м и 4-м положениям ОП от результатов кросс-калибровки по 8-ми положениям. Из графиков следует, что методическая погрешность зависит от амплитуд неисключенных гармоник систематической погрешности ЛДГ.

При исследовании метрологических характеристик ОДУ с измерительной решеткой, созданной голографическим методом, имеющей 162000 физических штрихов, характеризующейся разрешением $4''$, использовали прецизионный ЛДГ с воздушным подшипником. Учитывая, что систематическая погрешность ЛДГ распределена по гармоническому закону с основными низкочастотными гармониками, измерения проводили в 2-х, 3-х и 6-ти положениях ОДУ в интервале полного оборота через $0,1^\circ$. Согласно принципу действия тестируемого ОДУ, дальнейшее уменьшение дискретности съема не дает дополнительной информации [8]. На рис. 2 изображен спектр систематической погрешности ЛДГ, на котором приведены значимые гармоники с амплитудой более $10^{-4}''$. Как следует из рис. 2, систематическая погрешность ЛДГ, в основном, сосредоточена на 1-й и 2-ой гармониках. Случайная погрешность результатов измерений не превышает $0,005''$.

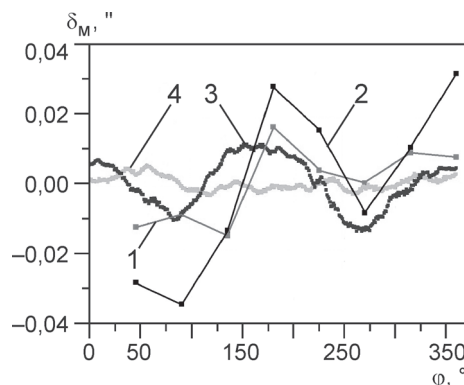


Рис. 1. Зависимость методической погрешности δ_m от угла φ поворота кольцевого лазера при упрощенной процедуре кросс-калибровки:

шагам углового перемещения ОП 180° и 90° соответствуют кривые 1, 2; шагам углового перемещения ОДУ 180° и 120° — кривые 3, 4

Кривыми 3, 4 на рис. 1 показаны графики методической погрешности упрощенной процедуры кросс-калибровки ОДУ δ_m , определяемой как разность результатов, полученных при угловых перемещениях ОДУ на 180° и 120° , и кросс-калибровки в 6-ти положениях. При упрощенной процедуре кросс-калибровки при 2-х угловых перемещениях, погрешность зависит от неисключенной 2-й гармоники погрешности ЛДГ, а при 3-х угловых перемещениях исключается 2-я гармоника погрешности ЛДГ и методическая погрешность находится на уровне случайной.

Из приведенных результатов можно сделать вывод, что использование ЛДГ при исследовании метрологических характеристик ДУ позволяет применять упрощенную процедуру кросс-калибровки, заключающуюся в ограниченном количестве угловых перемещений датчика, а при равномерных

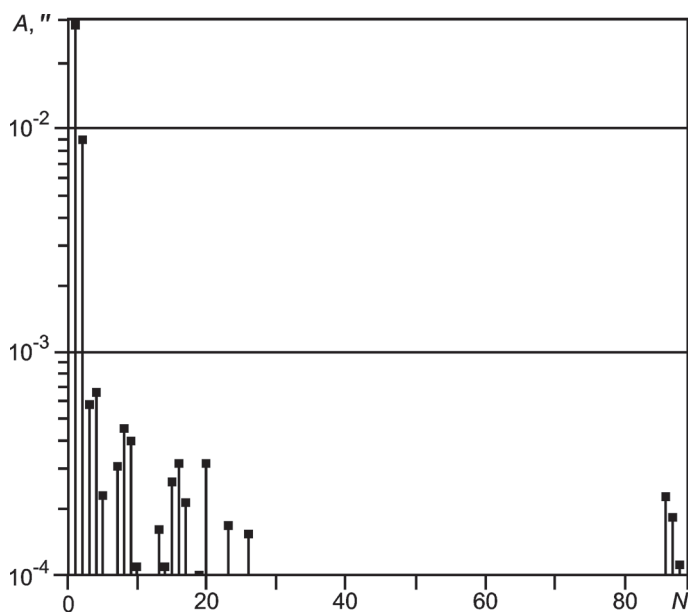


Рис. 2. Спектр систематической погрешности ЛДГ:

A — амплитуда гармоники; N — ее номер

шагах перемещений на углы менее 120° методическая погрешность не превышает 0,01".

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00693).

Л и т е р а т у р а

1. Sim P. J. Modern Techniques in Metrology // World Sci. 1984. P. 102—121.
2. Probst R., Wittekopf R., Krause M., Dangschat H., Ernst A. The new PTB angle comparator // Meas. Sci. Technol. 1998. N. 9. P. 1059—1066.
3. Бурнашев М. Н., Павлов П. А., Филатов Ю. В. Разработка прецизионных лазерных гониометрических систем // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 2. С. 130—138.
4. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров): М.: Наука, 1974.

5. Павлов П. А. Анализ алгоритмов измерений лазерным динамическим гониометром // Измерительная техника. 2008. № 1. С. 17—20.

6. Баринова Е. А., Иващенко Е. М., Павлов П. А. Кольцевой лазер в прецизионных угловых измерениях // Лазеры. Измерения. Информация: Сб. докл. 21-й Междунар. конф. 2011. Т. 1. С. 62—75.

7. Иващенко Е. М., Павлов П. А. Метод устранения влияния магнитного поля в лазерном динамическом гониометре // Измерительная техника. 2012. № 10. С. 18—22.

8. Баринова Е. А., Гордеев С. В., Иващенко Е. М., Павлов П. А. Метод и результаты исследования случайной погрешности оптического датчика угла // Метрология. 2011. № 7. С. 17—25.

Дата принятия 22.01.2015 г.

629.76.063.6

Погрешности датчиков уровня системы контроля заправки разгонного блока

С. В. БАЛАКИН^{1, 2}

¹ОАО РКК «Энергия» им. С. П. Королева, Королев, Россия

²Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ, Москва, Россия, e-mail: Stanislav.Balakin@rsce.ru

Рассмотрена методика расчета погрешности преобразования уровня жидкого кислорода в электрическую емкость блока датчиков уровня разгонного блока, представлены результаты исследований точностных характеристик. Показано, что погрешности основных и дублирующих каналов таких блоков не превышают требуемого значения.

Ключевые слова: датчики уровня, контроль заправки, кислород, криоген, диэлектрическая проницаемость, разгонный блок.

The procedure of calculating errors of the liquid oxygen level-to-capacitance conversion are considered and the results of experimental study of its accuracy characteristics are shown. It is shown that the errors of basic and duplicate channels of such units do not exceed the required value.

Key words: level transducers unit, filling control, oxygen, cryogenic, dielectric permittivity, accelerating unit.

Наряду с созданием новых систем вывода ракет среднего и тяжелого классов [1] в ракетно-космической отрасли проводится модернизация существующих ракет-носителей и разгонных блоков (РБ) для повышения их эффективности. Один из вариантов решения этой задачи — увеличение полезной нагрузки, что возможно при снижении гарантийных запасов горючего и окислителя и повышении точности измерений уровня при заправке жидкостных ракет [2].

При создании ракеты-носителя сверхтяжелого класса Н1 в рамках проекта «Лунная программа» была разработана пятая ступень ракеты, которую позже обновили и установили на ракету-носитель «Протон» в качестве РБ. В результате существенной модернизации указанного РБ был создан усовершенствованный блок ДМ повышенной грузоподъемности, на котором установлен блок датчиков уровня (БДУ), ана-

логичный ДМ-SLB (наземный старт) и ДМ-SL (морской старт). С использованием этого БДУ было проведено тринадцать успешных запусков РБ ДМ-SL и шесть — ДМ-SLB без замечаний по заправке жидким кислородом [3]. Надежность и точность емкостных непрерывных систем контроля заправки обеспечены и подтверждены теоретическими и экспериментальными работами, выполненными на всех баках ракет-носителей «Энергия» и «Союз-2». Однако для обоснования точностных характеристик системы усовершенствованного блока ДМ необходимы экспериментальные доказательства погрешности измерений БДУ уровня жидкого кислорода, не превышающей требуемого значения $\pm 0,8$ %.

Система контроля заправки (СКЗ), в состав которой входит БДУ, базируется на емкостном принципе действия при использовании существенной разницы диэлектрических про-