



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.787.7

DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-52-58

Е. В. ЛЕУН

АО «НПО Лавочкина»,
Московская область,
г. Химки

ОСОБЕННОСТИ СХЕМОТЕХНИКИ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТРЕХКООРДИНАТНЫХ (3D) ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ И ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ. ЧАСТЬ 2

В статье обсуждаются шумовые, динамические и точностные параметры акустооптических (АО) лазерных измерительных систем (ЛИС) для высокоточного контроля трехкоординатных (3D) смещений изделий. Показано, что при использовании в них современных быстродействующих малошумящих фотоприемников без специальных технических приемов сейчас достижимы разрешающие способности $\approx \frac{\lambda}{1800}$ и $\approx \frac{\Lambda_{\text{аом}}}{900}$ для продольных Δl_x и поперечных Δl_y , Δl_z смещений соответственно, где λ и $\Lambda_{\text{аом}}$ — длина волны света и ультразвук в АО модуляторе. Обсуждаются особенности использования в АО ЛИС систем ФАПЧ. Рассматриваются возможности повышения разрешающих способностей измерений смещений при использовании для одного входного оптического сигнала двух фотоприемников: быстродействующего и малошумящего, а также за счет управления шириной полосы пропускания системы ФАПЧ.

Ключевые слова: шумы сигнала, малошумящий фотоприемник, система ФАПЧ, джиттер, фазовый сдвиг, акустооптический модулятор, лазерный интерферометр.

Введение. Для развития высокоточных методов и средств трехкоординатных (3D) измерений смещений при производстве изделий и элементов оборудования ракетно-космической техники, авиации, машино-, приборо- и станкостроения и других от-

раслях недавно были начаты научные исследования акустооптических (АО) лазерных измерительных систем (ЛИС) с отработкой новых принципов построения [1–3]. Эта задача может быть разложена на две подзадачи: измерения однокоординатного

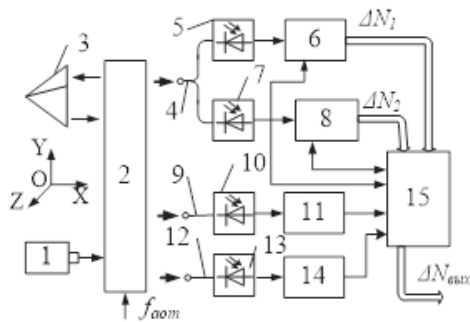


Рис. 1. Оптоэлектронная схема АО ЛИС для контроля 3D смещений

(1D) продольного Δl_x и двухкоординатных (2D) поперечных Δl_y и Δl_z смещений коллинеарных (вдоль оси OX) и ортогональных (вдоль осей OY и OZ) направлению распространения лазерного луча соответственно.

Подобные измерения используются при контроле отклонений от прямолинейности поверхностей изделий за счет высокоточных измерений продольных Δl_x [1, 2, 4–6] и поперечных Δl_y и Δl_z [1, 3, 7–9] смещений, определении траектории движения элементов оборудования, измерении смещений сканирующего лазерного луча в гибридной головке [10] и других задачах. Однако вопрос оценки шумов и влияния их на точностные и динамические параметры АО ЛИС не был полностью раскрыт в открытой печати, и данная статья направлена на восполнение этого недостатка.

1. Принцип действия и конструктивные особенности АО ЛИС при измерении 3D смещений.

Оптоэлектронная схема АО ЛИС для контроля 3D смещений в упрощенном виде показана на рис. 1. Согласно схеме, лазер 1 формирует когерентный оптический поток, поступающий в оптическую схему 2, содержащий АО модулятор (на рис. 1 не показан) и освещающий трипель-призму 3. Ее трехкоординатные (3D) смещения: 1D продольные Δl_x и 2D поперечные Δl_y , Δl_z смещения передаются отраженному лучу, который следует в обратном направлении, с помощью оптической схемы 2 преобразуется в три разночастотных оптических потока, следующих на входы оптических световодов 4, 9 и 12 и далее на входы фотоприемников 5, 7, 10, 13. Световод 4 представляет собой Y-образный волоконный разветвитель, подключенный к оптическим входам к быстродействующему 5 и малощумящему 7 фотоприемникам, используемым для реализации т.н. «быстрых грубых» и «медленных точных» измерений продольных перемещений соответственно.

Для измерения продольных смещений Δl_x используется двухканальная измерительная схема, состоящая из фазового интерполятора 6 [11] и системы ФАПЧ 8, подключенных к системе управления 15. Внутри нее находится фазометр малого диапазона, как в [12–14], не показанный на рис. 1.

Одной из особенностей этой схемы является управление переходом в режим синхронизма системы ФАПЧ 8, длительность которого, как правило, равна $3-4\tau$, где τ — постоянная времени. Более подробно конструкция и принцип действия двухканальной измерительной схемы с одним фотоприемником и реализацией «быстрых грубых» и «медленных точных» измерений продольных смещений описаны в [6]. Построение измерительной схемы

с быстродействующим 5 и малощумящим 7 фотоприемниками позволяет с помощью первого уменьшить ограничения по максимальной скорости продольных смещений, а с помощью второго снизить уровень шумов в измерительном сигнале, повысить соотношение сигнал/шум Q и достичь максимальной разрешающей способности. Режим работы системы управления 15 направлен на синхронизацию работы фазового интерполятора 6 и системы ФАПЧ 8.

Измерительные схемы 11 и 14 для контроля поперечных Δl_y , Δl_z смещений подключены к фотоприемникам 10 и 13 и, по сути, могут быть построены аналогично двухканальной измерительной схеме на основе фазового интерполятора и системе ФАПЧ (с фазометром малого диапазона) для продольных Δl_x смещений [1, 3, 9].

Использование систем ФАПЧ предполагает согласование параметров движения изделий с ее частотными характеристиками, частотой возбуждения АО модулятора f_{mog} и быстродействием измерительной схемы. И последующие анализ и расчеты проведены на примере использования следующих двух АО модуляторов:

1) АО модулятор 1: материал светозвукопровода — парателлуриит (TeO_2), частота АО модуляции $f_{mog} = 40$ МГц, скорость ультразвуковой волны (УЗВ) $v_{узв} \approx 616$ м/с, длина УЗВ $\Lambda_{узв} \approx 15,4$ мкм [6];

2) АО модулятор 2: материал светозвукопровода — вода (H_2O), частота АО модуляции $f_{mog} = 8$ МГц, скорость УЗВ $v_{узв} \approx 1480$ м/с, длина УЗВ $\Lambda_{узв} \approx 185$ мкм [5, 7, 9].

Согласно особенностям измерений геометрических параметров изделий, допуск на отклонение от прямолинейности существенно меньше длины измерений, например, не должен превышать 0,8 мм на длине 100 мм, то в дальнейшем можно использовать с одинаковым коэффициентом 0,008 отношение поперечного смещения к продольному и максимальным скоростям поперечных смещений v_{non} к продольным смещениям v_{prog} соответственно:

$$v_{non} \approx 0,008 \cdot v_{prog} \quad (1)$$

С другой стороны, скорости движения изделия можно определить, исходя из частотных параметров измерительной схемы для каждого режима измерений:

$$\text{— для продольных смещений } v_{prog} = \frac{f_{гон} \cdot \lambda}{2}; \quad (2)$$

$$\text{— для поперечных смещений } v_{non} = f_{гон} \cdot \Lambda_{узв}. \quad (3)$$

Значения доплеровских набегов частоты $f_{гон}$, частот измерительного сигнала, максимальных скоростей поперечных v_{non} и продольных v_{prog} смещений рассчитаны при использовании двух типов АО модуляторов и приведены в табл. 1.

2. Расчет составляющих разрешающей способности АО ЛИС.

Как следует из предыдущих исследований, разрешающая способность АО ЛИС определяется двумя основными составляющими: шумами сигнала в процессе фотопреобразования $\Delta\phi_{фн}$ оптического сигнала в электрический и джиттером $\Delta\phi_{гж}$, т.е. неопределенностью фронтов частотного сигнала генератора, управляемого напряжением (ГУН) системы ФАПЧ [1, 2, 6].

Принимая, что погрешности $\Delta\phi_{фн}$ и $\Delta\phi_{гж}$ имеют разную природу, независимы друг от друга и имеют нормальный закон распределения (закон Гаусса), то итоговая фазовая погрешность от их геометрического сложения определится как:

Шумовые характеристики для фотоприемников АО ЛИС для длины волны $\lambda \approx 650$ нм

N	f_{aom} , МГц	10	14	25	45	60
1	P_{NEP} , Вт/√Гц	$38 \cdot 10^{-15}$ *	$2,4 \cdot 10^{-12}$ **	$150 \cdot 10^{-15}$ *	$30 \cdot 10^{-12}$ **	$11 \cdot 10^{-12}$ **
2	Q ($\Delta f = 10^7$ Гц)	2000	2000	2000	600	2000
3	$\Delta\varphi_{ш}$, мрад	7,1	7,1	7,1	13	7,1
4	$\Delta I_{прог}$, нМ	0,355	0,355	0,355	0,65	0,355
5	$\Delta I_{нон}$, нМ ($\Lambda = 15,4$ мкм)	17,4	17,4	17,4	31,8	17,4
6	$\Delta I_{нон}$, мкм ($\Lambda = 185$ мкм)	0,2	0,2	0,2	0,38	0,2
7	$t_{гж}$, пс	3	3	3	3	3
8	$\Delta\varphi_{гж}$, мрад	0,19	0,264	0,471	0,848	1,13
9	$\Delta\varphi_{фн}/\Delta\varphi_{гж}$	37,4	26,9	15,1	15,3	6,3
10	$f_{фн2}$ ($\Delta\varphi_{фн} \approx \Delta\varphi_{гж}$), Гц	7161	13825,8	44007,3	42550,5	253302,9
11	$f_{фн3}$ ($\Delta\varphi_{фн} \ll \Delta\varphi_{гж}$), Гц	657,6	1269,6	4041,1	3907,3	23260,14
12	$\Delta\varphi_{\Sigma 1}$ (без сужения полосы), мрад	7,103	7,105	7,116	13,028	7,189
13	$\Delta\varphi_{\Sigma 2}$, мрад	0,266	0,3696	0,6594	1,1872	1,582
14	$\Delta\varphi_{\Sigma 3}$, мрад	0,19	0,264	0,471	0,848	1,13
15	$v_{пр1}$ ($\Delta\varphi_{фн} \approx \Delta\varphi_{гж}$), м/с	0,0023	0,0044	0,0139	0,0135	0,0801
16	$\Delta I_{пр1}$ ($\Delta\varphi_{фн} \approx \Delta\varphi_{гж}$), пМ	13,3	18,5	33	59,4	79,1
17	$v_{пр2}$ ($\Delta\varphi_{фн} \ll \Delta\varphi_{гж}$), м/с	0,00021	0,00040	0,00128	0,00124	0,00736
18	$\Delta I_{пр2}$ ($\Delta\varphi_{фн} \ll \Delta\varphi_{гж}$), пМ	9,6	13,2	23,55	42,4	56,5

Примечание:

* — фотоприемник ACUBE-3000-10, по данным 2019 г. из [15],

** — фотоприемник (Si-PIN фотодиод) OE-300-SI-30, по данным 2019 г. из [16],

*** — фотоприемник (PIN-фотодиод), по данным 2011 г. из [6].

$$\Delta\varphi_{\Sigma 1} = \sqrt{\Delta\varphi_{фн}^2 + \Delta\varphi_{гж}^2}. \quad (4)$$

Далее эти две компоненты и их влияние на точностные параметры АО ЛИС рассмотрены более подробно.

2.1. Влияние шумовых параметров элементов измерительной схемы на разрешающую способность АО ЛИС. Отношение сигнал/шум Q в процессе оптоэлектронного преобразования оптического сигнала в электрический можно определить по формуле [5]:

$$Q = \frac{SP_0^2 \gamma_{св}^2 \gamma_{он} \gamma_{изм}}{4\Delta f [qI_0 (\gamma_{он} + \gamma_{изм}) + 2SP_{NEP}^2]}, \quad (5)$$

где $\gamma_{св}$ — коэффициент связи, учитывающий неполное согласование фронтов и степень перекрытия оптических пучков, $\gamma_{он}$ и $\gamma_{изм}$ — коэффициенты, учитывающие эффекты несогласованности размера чувствительной площадки фотоприемника и диаметра пучка, возможного виньетирования и дифракционной расходимости пучков, P_0 — мощность излучения лазера, S — фоточувствительность фотоприемника, P_{NEP} — эквивалентная оптическая мощность излучения, приходящаяся на единицу частоты полосы пропускания (размерность Вт/Гц^{1/2}), Δf — полоса пропускания, q — заряд электрона, $1,6 \cdot 10^{-19}$ К.

Левый многочлен знаменателя выражения (5), содержащий коэффициенты $\gamma_{он}$ и $\gamma_{изм}$, связан с дробовыми шумами от сигнальной засветки фотоприемника. Правый многочлен знаменателя в фото-

муле (5), содержащий параметр P_{NEP}^2 , определяет такие шумовые составляющие, как дробовый шум от темнового тока, тепловой шум, шумы усилителя и фильтра и т. п.

Для фотоприемника, использованного в [5], можно принять, что уровень дробовых шумов, обусловленных сигнальной засветкой фотоприемника, меньше шумов, вызванных внутренним шумом фотоприемника, позволяя упростить формулу (5) к следующему виду:

$$Q = \frac{I_0^2 \gamma_{св}^2 \gamma_{оп} \gamma_{изм}}{8 \Delta P_{NEP}^2} = \frac{k_{фпу}}{\Delta P_{NEP}^2}, \quad (6)$$

где $k_{фпу} = \frac{I_0^2 \gamma_{св}^2 \gamma_{оп} \gamma_{изм}}{8}$ — коэффициент фотопреобразования фотоприемника.

При $\Delta f = 10^7$ Гц, $P_{NEP} = 30 \cdot 10^{-12}$ Вт/√Гц в [6] при использовании уравнения (1) определено расчетным путем значение $Q \approx 1000$. Однако, как и в [5], для повышения достоверности получаемых результатов за основу для дальнейших расчетов будет взято более низкое значение, а именно $Q \approx 600$.

Расчетами, приведенными в [6], было показано, что уровень дробового шума составлял ~30 % от общего уровня шумов. За прошедшие почти 10 лет после завершения работы [6] появились современные малошумящие фотоприемники с существенно более низким уровнем внутренних шумов фотоприемников так, что уровень дробовых шумов, обусловленных сигнальной засветкой фотоприемника, начинает превалировать в формуле (5). Поэтому можно предположить соответствующее повышение соотношения сигнал/шум у современных фотоприемников в 3,3 раза, т.е. до $Q \approx 2000$ (строка 2 табл. 1).

Разрешающая способность, обусловленная шумами сигнала фотоприемника $\Delta\varphi_{фн}$, определяется выражением [5]:

$$\Delta\varphi_{фн} = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{Q}}. \quad (7)$$

На основе этого выражения и с учетом ранее рассчитанных значений Q определены и сведены в строку 3 табл. 1 значения разрешающих способностей АО ЛИС $\Delta\varphi_{фн}$ для различных фотоприемников с разными частотными и шумовыми параметрами. С учетом этого для современных фотоприемников [15–16] на частотах 10, 14, 25 и 60 МГц имеем $Q \approx 2000$ и $\Delta\varphi_{фн} = 7,1$ мрад, а для 45 МГц и фотоприемника из [6] — $Q \approx 600$ и $\Delta\varphi_{фн} = 13$ мрад соответственно.

2.2. Влияние джиттера системы ФАПЧ на разрешающую способность АО ЛИС. Вторая составляющая, согласно формуле (4), также определяющая разрешающую способность АО ЛИС, связана т.н. джиттером системы ФАПЧ. Он обусловлен собственными шумами системы ФАПЧ, в первую очередь, шумами генератора, управляемого напряжением, приводящим к неопределенности фронта сигнала $\Delta t_{гж}$ во временной шкале (в долях секунды), который связан со спектральной плотностью мощности шумов $S_{\varphi}(f) = \sum A_i f^i$ [2]. Эта неопределенность во временной шкале приводит к соответствующим высокочастотным флуктуациям в виде фазового шума, определяя соответствующую составляющую погрешности измерения по фазовому сдвигу $\Delta\varphi_{гж}$:

$$\Delta\varphi_{гж} = 2\pi f \cdot \Delta t_{гж}. \quad (8)$$

Для разных генераторов, управляемых напряжением, к настоящему времени уже достижимы значения $\Delta t_{гж} \approx 1-5$ пс [17, 18]. Используя для расчетов значение $\Delta t_{гж} \approx 3$ пс (строка 8 табл. 1), получим ряд значений по фазовому сдвигу $\Delta\varphi_{гж}$, изменяющихся в диапазоне от 0,19 до 1,13 мрад, которые сведены в строку 8 табл. 1.

В строке 9 табл. 1 приведены значения отношения $\Delta\varphi_{фн}/\Delta\varphi_{гж}$, которые в диапазоне частот от 10 МГц до 60 МГц уменьшаются от 37,4 до 6,3. Полученные значения $\Delta\varphi_{фн}/\Delta\varphi_{гж}$ показывают, что разрешающая способность $\Delta\varphi_{фн}$, обусловленная шумами фотоприемного тракта $\Delta\varphi_{фн}$, превалирует над разрешающей способностью из-за джиттера $\Delta\varphi_{гж}$ системы ФАПЧ. Для уменьшения уровня входных для системы ФАПЧ шумов от фотоприемника $\Delta\varphi_{фн}$, как минимум, до уровня джиттера $\Delta\varphi_{гж}$: $\Delta\varphi_{фн} \approx \Delta\varphi_{гж}$, а в идеале и еще меньше, чтобы можно было его пренебречь: $\Delta\varphi_{фн} \ll \Delta\varphi_{гж}$ необходимо обеспечить оптимальный выбор частоты фильтра низких частот (ФНЧ).

2.3. Выбор оптимальной частоты ФНЧ системы ФАПЧ для достижения минимума разрешающей способности АО ЛИС. Как следует из уравнений (5–7), разрешающая способность от шумов фотоприемника $\Delta\varphi_{фн}$ пропорциональна корню квадратному от полосы пропускания Δf АО ЛИС, определяемой доплеровским набегом частоты $f_{гон}$ и частотой среза ФНЧ $f_{фнч}$:

$$\Delta\varphi_{фн} \sim \sqrt{\Delta f} = \sqrt{f_{фнч}}. \quad (9)$$

Как видно, уменьшение $f_{фнч}$ в $(\Delta\varphi_{фн}/\Delta\varphi_{гж})^2$ приводит к уменьшению $\Delta\varphi_{фн}$ и для достижения равенства $\Delta\varphi_{фн} \approx \Delta\varphi_{гж}$ в диапазоне частот от 10 МГц до 60 МГц рассчитаны значения $f_{фнч}$, представленные в строке 10 табл. 1, которые увеличиваются от 7161 до 253302,9 Гц.

Поэтому, чтобы пренебречь уровнем $\Delta\varphi_{фн}$ по сравнению с $\Delta\varphi_{гж}$ согласно выражению (4), необходимо выполнение условия: $\Delta\varphi_{фн} = 0,3\Delta\varphi_{гж}$, которое может быть обеспечено при уменьшении $f_{фнч}$ в $3,3^2 \approx 11$ раз. Рассчитанные значения $f_{фнч}$ приведены в строке 11 табл. 1, увеличиваясь с 657,7 до $\approx 23260,14$ Гц.

При уменьшении полосы пропускания получим два минимальных значения $\Delta\varphi_{\Sigma 2}$ и $\Delta\varphi_{\Sigma 3}$:

— для условия равенства погрешностей $\Delta\varphi_{фн} \approx \Delta\varphi_{гж}$

$$\Delta\varphi_{\Sigma 2} = \sqrt{\Delta\varphi_{фн}^2 + \Delta\varphi_{гж}^2} = \Delta\varphi_{гж} \sqrt{2}; \quad (10)$$

— для условия преобладания $\Delta\varphi_{гж}$ над $\Delta\varphi_{фн}$: $\Delta\varphi_{фн} \ll \Delta\varphi_{гж}$:

$$\Delta\varphi_{\Sigma 3} = \Delta\varphi_{гж}. \quad (11)$$

На рис. 2 показаны графики трех фазовых погрешностей измерения АО ЛИС в зависимости от ширины полос пропускания: погрешность $\Delta\varphi_{\Sigma 1}$ без уменьшения полосы пропускания, погрешность $\Delta\varphi_{\Sigma 2}$ с уменьшением полосы пропускания и выполнением условия $\Delta\varphi_{фн} \approx \Delta\varphi_{гж}$, погрешность $\Delta\varphi_{\Sigma 3}$ с уменьшением полосы пропускания и выполнением условия $\Delta\varphi_{фн} \ll \Delta\varphi_{гж}$.

3. Расчет разрешающих способностей и скоростей движения АО ЛИС для продольных и поперечных смещений. Для предложенных подходов к построению оптоэлектронной схемы АО ЛИС

рассчитаем разрешающие способности и скорости движения для продольных и поперечных смещений с учетом преимущественно двух условий в вышеприведенных расчетах погрешностей измерения фазы: $\Delta\varphi_{\text{фн}} \approx \Delta\varphi_{\text{гж}}$ и $\Delta\varphi_{\text{фн}} \ll \Delta\varphi_{\text{гж}}$ соответственно.

3.1. Расчет разрешающих способностей и скоростей движения АО ЛИС для продольных смещений. При измерениях продольных смещений в АО ЛИС можно использовать следующие выражения:

для разрешающих способностей $\Delta l_{\text{пр}}$:

$$\Delta l_{\text{пр}} = \frac{\lambda \cdot \Delta\varphi_{\Sigma}}{4\pi} \quad (12)$$

и скорости движения $v_{\text{пр}}$:

$$v_{\text{прог}} = \frac{\lambda \cdot f_{\text{дон}}}{2} = \frac{\lambda \cdot \Delta f}{2} = \frac{\lambda \cdot f_{\text{фнч}}}{2} = 0,316 \cdot 10^{-6} \cdot f_{\text{фнч}}, \quad (13)$$

где $f_{\text{дон}}$, Δf и $f_{\text{фнч}}$ — доплеровский набег частоты, который соответствует ширине полосы пропускания системы ФАПЧ Δf или частоте среза $f_{\text{фнч}}$ ее фильтра низких частот, λ — длина волны света при использовании гелий-неонового лазера $\lambda = 0,6328$ мкм.

Итак, для $f_{\text{фнч}2}$ при условии $\Delta\varphi_{\text{фн}} \approx \Delta\varphi_{\text{гж}}$ и $\Delta\varphi_{\Sigma 2} = \Delta\varphi_{\text{гж}} \sqrt{2}$ на основании проведенных расчетов имеем:

— для двух минимальных значений $\Delta\varphi_{\Sigma 2}$ 0,266 и 1,582 мрад (рис. 2) получим изменения $\Delta l_{\text{пр}2}$ от $\lambda/47240$ до $\approx \lambda/7940$ в диапазоне частот АО модуляции $f_{\text{аом}}$ от 10 МГц до 60 МГц соответственно. И, как видно на рис. 3, при $\lambda = 0,6328$ мкм $\Delta l_{\text{пр}2}$ изменяется от $\approx 13,3$ пм до ≈ 80 пм соответственно. При этом $f_{\text{фнч}2}$ изменяется от 7,161 до $\approx 253,3$ кГц;

— максимальная скорость перемещений $v_{\text{пр}2}$ определяемая по формуле (13), с учетом $f_{\text{фнч}} = f_{\text{фнч}2}$ изменяется от 0,0023 до 0,08 м/с для изменений $f_{\text{аом}}$ от 10 МГц и 60 МГц соответственно. График зависимости $v_{\text{пр}2}$ для пяти значений частоты в вышеуказанном диапазоне приведен на рис. 4.

Если в расчеты заложены исходные данные $f_{\text{фнч}3}$, $\Delta\varphi_{\text{фн}} \ll \Delta\varphi_{\text{гж}}$ и $\Delta\varphi_{\Sigma 2} = \Delta\varphi_{\text{гж}}$, то имеем следующие результаты:

— для двух минимальных значений $\Delta\varphi_{\Sigma 3}$ 0,19 и 1,13 мрад (рис. 2) получим изменения $\Delta l_{\text{пр}3}$ от $\approx \lambda/66140$ до $\approx \lambda/11120$ в диапазоне $f_{\text{аом}}$ от 10 МГц до 60 МГц соответственно. И, как видно на рис. 3, при $\lambda = 0,6328$ мкм $\Delta l_{\text{пр}3}$ изменяется от $\approx 9,6$ пм до ≈ 56 пм соответственно. При этом $f_{\text{фнч}2}$ изменяется от 0,657 до $\approx 23,26$ кГц;

— максимальная скорость перемещений $v_{\text{пр}2}$ определяемая по формуле (13), с учетом $f_{\text{фнч}} = f_{\text{фнч}3}$ изменяется от 0,00021 до $\approx 0,007$ м/с для изменений $f_{\text{аом}}$ от 10 МГц и 60 МГц соответственно. График зависимости $v_{\text{пр}3}$ для пяти значений частоты в вышеуказанном диапазоне приведен на рис. 4.

Как видно, уменьшение полосы пропускания Δf и частоты среза $f_{\text{фнч}}$ фильтра низких частот системы ФАПЧ позволяет существенно уменьшить шумовую составляющую и достичь высоких значений разрешающих способностей (вплоть до $\approx \lambda/66140$ или $\approx 9,6$ пм при $f_{\text{аом}} = 10$ МГц) при продольных смещениях $\Delta l_{\text{пр}}$ ценой соответствующего значительно снижения максимальной скорости движения $v_{\text{пр}}$ (вплоть до 0,00021 м/с). Эти расчеты являются основой для проектирования АО ЛИС не только с двухэтапным измерением перемещений: «быстрые грубые» и «медленные точные», но и также для трехэтапных измерений: «быстрые грубые», «средняя скорость

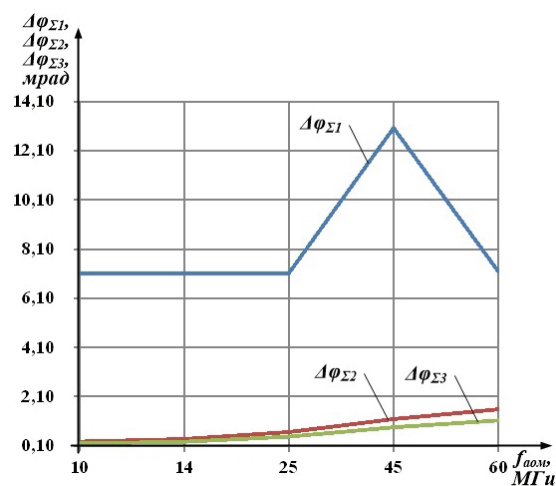


Рис. 2. Графики фазовых погрешностей измерения АО ЛИС в зависимости от ширины полос пропускания: погрешность $\Delta\varphi_{\Sigma 1}$ без уменьшения полосы пропускания, погрешность $\Delta\varphi_{\Sigma 2}$ с уменьшением полосы пропускания и выполнением условия $\Delta\varphi_{\text{фн}} \approx \Delta\varphi_{\text{гж}}$, погрешность $\Delta\varphi_{\Sigma 3}$ с уменьшением полосы пропускания и выполнением условия $\Delta\varphi_{\text{фн}} \ll \Delta\varphi_{\text{гж}}$

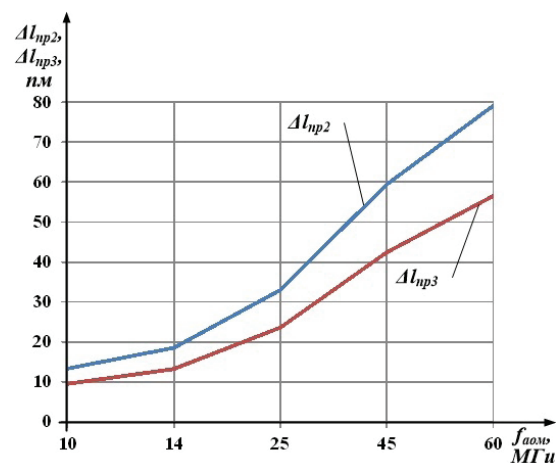


Рис. 3. Графики погрешностей измерения продольных смещения АО ЛИС $\Delta l_{\text{пр}2}$ и $\Delta l_{\text{пр}3}$ с уменьшением полос пропускания для выполнения условий $\Delta\varphi_{\text{фн}} \approx \Delta\varphi_{\text{гж}}$ и $\Delta\varphi_{\text{фн}} \ll \Delta\varphi_{\text{гж}}$ соответственно

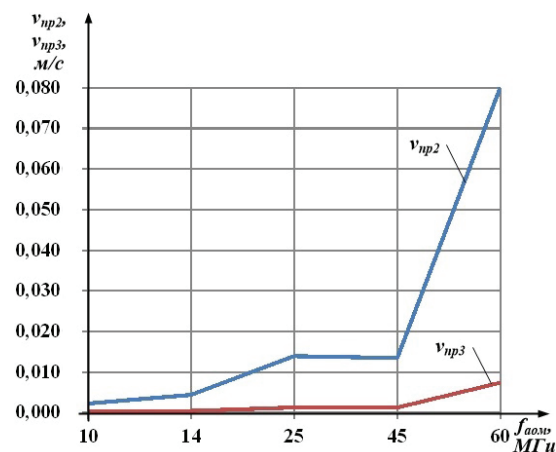


Рис. 4. Графики скоростей движения при продольных смещениях АО ЛИС $v_{\text{пр}2}$ и $v_{\text{пр}3}$ с уменьшением полос пропускания для выполнения условий $\Delta\varphi_{\text{фн}} \approx \Delta\varphi_{\text{гж}}$ и $\Delta\varphi_{\text{фн}} \ll \Delta\varphi_{\text{гж}}$ соответственно

движений — средняя точность измерений» и «медленные точные». Такой подход обеспечивает наиболее оптимальный компромисс между достижением высоких точностных и динамических показателей.

3.2. Расчет разрешающих способностей и скоростей движения АО ЛИС для поперечных смещений. При измерениях поперечных смещений в АО ЛИС по аналогии с формулами (12) и (13) необходимо использовать выражения:

для разрешающих способностей $\Delta l_{\text{нон}}$:

$$\Delta l_{\text{нон}} = \frac{\Lambda_{\text{аом}} \cdot \Delta \varphi_{\Sigma}}{2\pi} \quad (14)$$

и скорости движения $v_{\text{нон}}$:

$$v_{\text{нон}} = \Lambda_{\text{аом}} \cdot f_{\text{гоп}} = \Lambda_{\text{аом}} \cdot \Delta f = \Lambda_{\text{аом}} \cdot f_{\text{фнч}}, \quad (15)$$

где $f_{\text{гоп}}$, Δf и $f_{\text{фнч}}$ — доплеровский набег частоты, который соответствует ширине полосы пропускания системы ФАПЧ Δf или частоте среза $f_{\text{фнч}}$ ее фильтра низких частот, $\Lambda_{\text{аом}}$ — длина волны ультразвука в АО модулятора.

Проведение расчетов для поперечных смещений аналогично вышеприведенным, приводит к существенно большей многовариантности, т.к.

$$\Lambda_{\text{аом}} = \frac{v_{\text{зв}}}{f_{\text{аом}}}, \quad (16)$$

и для разных светозвукопроводов АО модуляторов $v_{\text{зв}}$ имеет разные значения. Поэтому проведем упрощенный расчет только лишь при условии использования в АО модуляторе светозвукопроводов из парателлурита (TeO_2) с длиной ультразвука $\Lambda_{\text{аом}} = 15,4$ мкм и воды (H_2O) с длиной УЗВ $\Lambda_{\text{аом}} = 185$ мкм, принимая с некоторым приближением $f_{\text{аом}}$ равным 10 МГц и 45 МГц соответственно.

Итак, для $f_{\text{фнч2}}$ при условии $\Delta \varphi_{\text{фн}} \approx \Delta \varphi_{\text{гж}}$ и на основании проведенных расчетов имеем:

— для двух минимальных значений $\Delta \varphi_{\Sigma 2}$ 0,266 и 1,19 мрад получим два значения $\Delta l_{\text{нон2}}$ $\Lambda_{\text{аом}}/23620$ и $\approx \Lambda_{\text{аом}}/3970$. И при $\Lambda_{\text{аом}} = 185$ мкм ($f_{\text{аом}} \approx 10$ МГц) и $\Lambda_{\text{аом}} = 15,4$ мкм ($f_{\text{аом}} \approx 45$ МГц) для значения $\Delta l_{\text{нон2}}$ имеем 7,8 нм и 2,9 нм соответственно;

— максимальная скорость перемещений $v_{\text{пр2}'}$ определяемая по формуле (15), с учетом $f_{\text{фнч}} = f_{\text{фнч2}}$ имеем 1,32 м/с и 0,65 м/с.

Если в расчеты заложены исходные данные $f_{\text{фнч3}'}$ $\Delta \varphi_{\text{фн}} \ll \Delta \varphi_{\text{гж}}$ и $\Delta \varphi_{\Sigma 2} = \Delta \varphi_{\text{гж}'}$, то имеем следующие результаты:

— для двух минимальных значений $\Delta \varphi_{\Sigma 3}$ 0,19 и 0,848 мрад получим два значения $\Delta l_{\text{нон3}}$ $\approx \Lambda_{\text{аом}}/33070$ и $\approx \Lambda_{\text{аом}}/5560$. И при $\Lambda_{\text{аом}} = 185$ мкм ($f_{\text{аом}} \approx 10$ МГц) и $\Lambda_{\text{аом}} = 15,4$ мкм ($f_{\text{аом}} \approx 45$ МГц) для значения $\Delta l_{\text{нон3}}$ имеем 5,6 нм и 2,8 нм соответственно;

— максимальная скорость перемещений $v_{\text{пр2}'}$ определяемая по формуле (15), с учетом $f_{\text{фнч}} = f_{\text{фнч3}'}$ имеем 0,12 м/с и 0,06 м/с.

Как видно, полученные значения разрешающих способностей при поперечных смещениях могут быть существенно улучшены по сравнению с прежними результатами исследований из [3, 7–9]. Также можно добиться существенного повышения соотношения между максимальными скоростями для продольных и поперечных смещений, приведенными ранее в уравнении (1).

Заключение. 1. Современный технологический уровень развития производства быстродействующих

малошумящих фотоприемников позволяет без специальных технических приемов достичь следующих значений разрешающей способности АО ЛИС:

— $\approx \frac{\lambda}{1800}$ для продольных смещений Δl_x и равно 0,355 нм при $\lambda = 0,63$ мкм;

— $\approx \frac{\Lambda_{\text{аом}}}{900}$ для поперечных смещений $\Delta l_y, \Delta l_z$.

2. Для повышения разрешающей способности измерения продольных смещений Δl_x перспективен не только двухэтапный режим измерений, состоящий из т.н. «быстрых грубых» и «медленных точных» измерений, но и использование двух измерительных каналов с двумя отдельными фотоприемниками для одного входного оптического сигнала. При этом для «быстрых грубых» измерений используется быстродействующий фотоприемник, а для «медленных точных» — малошумящий.

3. Поперечные смещения Δl_y и Δl_z характеризуются, как правило, низкой скоростью движений, что позволяет обойтись использованием одного измерительного канала на основе малошумящего фотоприемника, работающего совместно с системой ФАПЧ с узкой полосой пропускания.

4. Управление шириной полосы пропускания f (и частоты среза $f_{\text{фнч}}$ фильтра низких частот) системы ФАПЧ в составе АО ЛИС позволяют реализовать два режима работы с разными соотношениями между разрешающей способностью $\Delta \varphi_{\text{фн}'}$ обусловленной шумами фотоприемника, и разрешающей способностью $\Delta \varphi_{\text{гж}}$ из-за джиттера:

— с сопоставимыми значениями $\Delta \varphi_{\text{фн}} \approx \Delta \varphi_{\text{гж}'}$ достигая разрешающих способностей от $\lambda/47240$ ($\approx 13,3$ пм) до $\approx \lambda/7940$ (≈ 80 пм) в диапазоне частот АО модуляции $f_{\text{аом}}$ от 10 МГц до 60 МГц для продольных смещений Δl_x и $\Lambda_{\text{аом}}/23620$ (7,8 нм) и $\approx \Lambda_{\text{аом}}/3970$ (2,9 нм) при $\Lambda_{\text{аом}} = 185$ мкм ($f_{\text{аом}} \approx 10$ МГц) и $\Lambda_{\text{аом}} = 15,4$ мкм ($f_{\text{аом}} \approx 45$ МГц) для поперечных смещений $\Delta l_y, \Delta l_z$ соответственно.

— с преобладанием $\Delta \varphi_{\text{гж}}$ над $\Delta \varphi_{\text{фн}'}$: $\Delta \varphi_{\text{фн}} \ll \Delta \varphi_{\text{гж}'}$ достигая разрешающих способностей от $\approx \lambda/66140$ ($\approx 9,6$ пм) до $\approx \lambda/11120$ (≈ 56 пм) в диапазоне $f_{\text{аом}}$ от 10 МГц до 60 МГц для продольных смещений

5. Повышение разрешающих способностей АО ЛИС за счет уменьшения ширины полосы пропускания системы ФАПЧ приводит к снижению максимальной скорости движения. Поиск компромисса между точностными и динамическими параметрами обуславливают необходимость создания не только двухэтапных измерений перемещений: «быстрые грубые» и «медленные точные», но и также для трехэтапных измерений: «быстрые грубые», «средняя скорость движений — средняя точность измерений» и «медленные точные».

Благодарности

Автор благодарит кандидата технических наук, доцента кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, директора научно-образовательного центра «НИИРП ОмГТУ» Завьялова С. А. за советы по вопросам работы системы ФАПЧ.

Библиографический список

1. Леун Е. В. Особенности схемотехники акустооптических лазерных систем для измерения трехкоординатных перемещений. Часть 1 // Омский научный вестник. 2020.

№ 5 (173). С. 103–110. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-103-110.

2. Леун Е. В. Повышение быстродействия и разрешающей способности акустооптических гетеродинных лазерных интерферометров перемещений. Адаптивный лазерный интерферометр // Омский научный вестник. 2020. № 3 (171). С. 92–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-92-98.

3. Леун Е. В. Акустооптический способ измерения двухкоординатных смещений лазерного луча в направлениях ортогональных его оси // Динамика систем, механизмов и машин. 2020. Т. 8, № 2. С. 63–72. DOI: 10.25206/2310-9793-8-1-63-72.

4. Леун Е. В. Особенности схемотехники акустооптических лазерных систем для измерения перемещений с фазоцифровым преобразованием // Технология машиностроения. 2002. № 5. С. 33–40.

5. Игнатов С. А. Повышение разрешающей способности лазерных измерительных систем для контроля оборудования ГПС методом акустооптоэлектронной обработки информации: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1987. 231 с.

6. Гришин С. Г. Гетеродинная лазерная интерференционная система для измерения линейных перемещений с анизотропным акустооптическим преобразованием частоты света: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2012. 200 с.

7. Яковлев Н. А. Построение лазерных систем для измерения перемещения по трем координатам на основе акустооптического преобразования измерительной информации: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1991. С. 235.

8. А. с. 1696851 СССР, МПК G 01 B 9/02. Интерферометр для измерения отклонений от плоскостности // Базыкин С. Н., Базыкина Н. И., Капезин С. В., Телешевский В. И., Яковлев Н. А. № 4710084/28; заявл. 26.06.89; опубл. 07.12.89, Бюл. № 45.

9. Леун Е. В. Совершенствование методов и средств контроля отклонений от прямолинейности на основе акустооптических гетеродинных лазерных измерительных систем // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 71–77. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-71-77.

10. Леун Е. В., Шаханов А. Е. Повышение точности гибридных сканирующих 3D волоконно-оптических измерительных головок с акустооптическим датчиком обратной связи для контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 63–70. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-63-70.

11. Пат. 2016380 Российская Федерация, МПК G01B21/00. Способ автоматической интерполяции фазового сдвига в лазерных интерферометрах и устройство для его осуществления / Михальченко Е. П., Рюмин А. В., Яковлев Н. А. № 4911738; заявл. 15.02.91; опубл. 15.07.94.

12. Гончаренко А. М., Бугров С. В., Воевода А. А. [и др.]. Метрологические испытания цифрового прецизионного фа-

зометра // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2009. № 2 (56). С. 109–114.

13. Пат. 2582625 Российская Федерация, МПК G 01 R 23/02. Фазометр / Жмудь В. А., Ляпидевский А. В. № 2015106094; заявл. 20.02.15; опубл. 27.04.16. Бюл. № 12.

14. Пат. 2225012 Российская Федерация, МПК G 01 R 25/00, H 03 D 13/00. Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты / Гончаренко А. М., Васильев В. А., Жмудь В. А. № 2002110630; заявл. 19.04.02; опубл. 27.02.04.

15. Фотоприемник OE-300-SI. Даташит для OE-300-SI-30. URL: https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Datasheets/femto/photoreceiver/oe-300-si-30.pdf&no_cache=1 (дата обращения: 02.02.2021).

16. Высокочувствительные фотоприемники. Даташит для A-Cube-Series High sensitivity APD Detector Modules. URL: https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Datasheets/lc-electronics/a-cube.pdf&no_cache=1 (дата обращения: 02.02.2021).

17. Генераторы кварцевые ГК-152-УН-А. ЗАО НПФ «БМГ ПЛЮС». URL: <http://www.bmgplus.ru/images/pdf/pdf152a.pdf> (дата обращения: 02.02.2021).

18. Генераторы, управляемые напряжением серии 6U. Даташит для 6U-10.000МВЕ-Т (ТХС), 6U-25.000МВЕ-Т (ТХС), 6U-16.38. URL: https://www.terraelectronica.ru/pdf/show?pdf_file=http%253A%252F%252Fwww.farnell.com%252Fdatasheets%252F1740905.pdf (дата обращения: 02.02.2021).

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер.

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

Для цитирования

Леун Е. В. Особенности схемотехники акустооптических лазерных измерительных систем для контроля трехкоординатных (3D) перемещений изделий и элементов оборудования. Часть 2 // Омский научный вестник. 2021. № 2 (176). С. 52–58. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-52-58

Статья поступила в редакцию 25.02.2021 г.

© Е. В. Леун