

## ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СХЕМОТЕХНИКИ ВЫСОКОТОЧНЫХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ЧАСТОТНЫМ СОГЛАСОВАНИЕМ СОСТАВЛЯЮЩИХ БЛОКОВ И ДВОЙНОГО ГЕТЕРОДИНИРОВАНИЯ НА ЭТАПЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В статье рассматриваются развитие схемотехники акустооптических (АО) лазерных интерферометров перемещений (ЛИП) и достижимые ими значения разрешающей способности. Обсуждаются вопросы частотного согласования блоков АО ЛИП: АО модулятора, фотоприемного устройства (ФПУ) и генератора частоты. Изучаются особенности фотопреобразования ФПУ при его освещении тремя пространственно совмещенными оптическими потоками. Из них два потока разночастотные и созданы в результате дифракции в АО модуляторе и используются для измерения фазового набега от контролируемых смещений объекта. Третий оптический поток является амплитудно-модулированным с частотой модуляции, близкой к разностной частоте первых двух оптических потоков. Такой прием приводит к двукратному переносу (двойное гетеродинирование) фазового набега от смещений на электрический сигнал разностной частоты между тремя оптическими потоками.

Рассматриваются схемы АО ЛИП с постоянным значением частоты амплитудно-модулированного оптического потока и с ее автоподстройкой. Обсуждаются особенности использования в АО ЛИП охлаждаемых ФПУ.

**Ключевые слова:** лазерный интерферометр перемещений, гетеродинирование оптических сигналов, шумы фотоприемника, джиттер генератора, фильтрация сигнала, охлаждаемый фотоприемник, автоподстройка частоты.

**Введение.** Совершенствование технических характеристик лазерных интерферометров перемещений (ЛИП), в частности, разрешающей способности и быстродействия, скорости движений контролируемых изделий является основой задела в высокотехнологическом импортозамещающем производстве в период санкций и в итоге высокотехнологической независимости России. Такие перспективные ЛИП востребованы при контроле параметров формы сверхвысокоточных зеркал космических радиотелескопов, координатных измерений на координатных измерительных машинах, в приборо-, машино-, станкостроении, а также в опто- и микроэлектронике, зондовой микроскопии, нанотехнологиях, медицине и микробиологии, атомной физике и других быстроразвивающихся высоких технологиях [1–22]. К настоящему времени перспективны ЛИП

с разрешающей способностью субмикрометрических значений [16, 18–21] и скорости движений до нескольких метров в секунду.

В [15, 16] исследуются двухканальные ЛИП с акустооптической (АО) модуляцией оптического потока для старт-стопных перемещений в два этапа с «медленными точными» и «быстрыми грубыми» измерениями. Показано, что достижение разрешающей способности менее 1 пикометра возможно при рабочих частотах не более 27–30 МГц.

Составляющие блоки АО ЛИП могут иметь разные параметры. Так, современные малощумящие фотоприемные устройства (ФПУ) работают, как правило, на частотах не выше 25–30 МГц. Возможно использование охлаждаемых ФПУ с минимальным уровнем шумов. Некоторые АО модуляторы работают на частотах 30–60 МГц. И, как видно,

возможно большое количество схемных решений АО ЛИП для различных задач измерения смещений с разными точностными и скоростными параметрами. Это расширяет арсенал используемых комплектов, обуславливая необходимость их частотного согласования для создания задела схемных решений перспективных высокоточных быстродействующих АО ЛИП.

Поэтому вопросы совершенствования схемотехники, обеспечения задела перспективных схемных решений при частотном согласовании всех блоков АО ЛИП является актуальной задачей. Существующие в открытой печати публикации недостаточно раскрывают эти вопросы, и данная статья направлена на восполнение этого недостатка.

**1. Анализ основных технических параметров составляющих блоков высокоточных и быстродействующих АО ЛИП.** Как следует из [15, 16], на разрешающую способность АО ЛИП влияет дрожание фронта сигнала генератора  $\Delta t_{гж}$  по временной шкале, называемое джиттером, и уровень шумов ФПУ. Поэтому важно понимать их ожидаемые значения с учетом современного достигнутого технологического уровня. Для дальнейшего исследования принимается, что уровень шумов лазера, лазерного излучателя и АО модулятора намного ниже, чем у других блоков ЛИП, и ими можно пренебречь.

**1.1. Джиттер генераторов частоты для АО ЛИП.** Джиттер фронта сигнала генератора по временной шкале  $\Delta t_{гж}$  формирует фазовую погрешность  $\Delta\varphi_{гж}$ :

$$\Delta\varphi_{гж} = 2\pi f \Delta t_{гж}, \quad (1)$$

которую с учетом выражения для погрешности измерений

$$\Delta l = \frac{\lambda \cdot \Delta\varphi}{4\pi} \quad (2)$$

можно записать в виде уравнения

$$\Delta l_{гж} = \frac{\lambda \cdot f \Delta t_{гж}}{2}. \quad (3)$$

Как следует из [23–26], современный минимально достижимый уровень джиттера  $\Delta t_{гж}$  для микросхем массового производства достигает 50 фс. Можно допустить, что в исследовательских целях для единичного производства уровень джиттера  $\Delta t_{гж}$  может быть уменьшен до 30 фс.

С учетом этого были рассчитаны значения рабочей частоты при изменении джиттера  $\Delta t_{гж}$  от 30 до 150 фс с шагом 10 фс и  $\Delta l_{гж}$  от 0,7 нм до 1,0 нм с шагом 0,1 нм в соответствии с выражением, полученным из (3):

$$f = \frac{2\Delta l_{гж}}{\lambda \Delta t_{гж}}. \quad (4)$$

Как видно из графиков (рис. 1), при  $\Delta t_{гж} = 30$  фс реально достижение значений частоты генератора  $f_r$  от  $\approx 75$  МГц (при  $\Delta l_{гж} = 0,7$  нм) до  $\approx 105$  МГц ( $\Delta l_{гж} = 1,0$  нм).

**1.2. Шумы ФПУ.** Шумы, формируемые ФПУ, также ограничивают разрешающую способность АО ЛИП, а их анализ присутствует во многих подобных исследованиях [4, 9, 11–16].

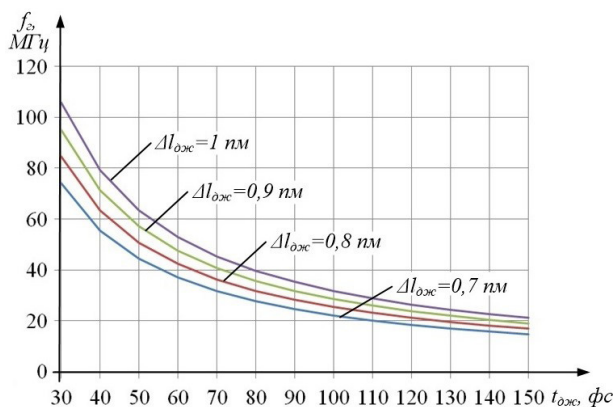


Рис. 1. Зависимости частоты генератора  $f_r$  от джиттера  $\Delta t_{гж}$  для вносимой погрешности измерений  $\Delta l_{гж} = 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$  нм

Рассмотрим влияние шумов наиболее распространенных кремниевых ФПУ [27, 28] и охлаждаемых ФПУ на основе теллурида ртути кадмия (HgCdTe) [29] на разрешающую способность АО ЛИП в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн соответственно.

**1.2.1. Шумы кремниевых ФПУ в видимом диапазоне длин волн.** В [12, 15, 16] был рассмотрен двухблочный АО ЛИП с использованием двух разночастотных кремниевых ФПУ: высокочастотным (ВЧ) и низкочастотным (НЧ) малощумящим, работающими с «быстрым грубым» и «медленным точным» измерительными каналами соответственно. Для расчета достигаемой разрешающей способности для частотного диапазона от 0 до 81 МГц (с учетом удобства расчетов для частот кратных 3: 0, 3, 9, 24, 81 МГц) ранее были определены две ШЧХ для ФПУ в виде кусочно-линейных функций (рис. 2) [15]: «пессимистическая» для верхней границы уровня шумов

$$P'_{NEP\text{ нч}}(f) = \begin{cases} 0,00385f + 0,0075, & f \leq 24 \text{ МГц}, \\ 0,174f - 4,068, & f > 24 \text{ МГц} \end{cases} \quad (5)$$

и «оптимистическая» для нижней границы уровня шумов

$$P''_{NEP\text{ нч}}(f) = \begin{cases} 0,00385f + 0,0075, & f \leq 24 \text{ МГц}, \\ 10^{0,0351f - 1,842}, & f > 24 \text{ МГц}. \end{cases} \quad (6)$$

Однако эти ШЧХ трудно использовать для расчетов. Поэтому была определена ШЧХ ФПУ по имеющимся справочным значениям шумов для пяти значений частот, максимально близким к вышеуказанным (в МГц):  $P_{NEP}(1) = 0,0075 \cdot 10^{-12}$  Вт·Гц $^{-1/2}$ ,  $P_{NEP}(3) = 0,0075 \cdot 10^{-12}$  Вт·Гц $^{-1/2}$ ,  $P_{NEP}(10) = 0,0375 \cdot 10^{-12}$  Вт·Гц $^{-1/2}$ ,  $P_{NEP}(25) = 0,1 \cdot 10^{-12}$  Вт·Гц $^{-1/2}$  [27],  $P_{NEP}(80) = 10 \cdot 10^{-12}$  Вт·Гц $^{-1/2}$  [28]. Искомая зависимость шумов  $P_{NEP}(f)$  для диапазона частот вплоть до 80 МГц составлена на основе кубической функции (рис. 2):

$$P_{NEP}(f) = 30,8 \cdot 10^{-6} f^3 - 102,7 \cdot 10^{-5} f^2 + 102,2 \cdot 10^{-4} f + 5,5 \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

Но для более точных расчетов  $P_{NEP}(f)$  в узком диапазоне частот 0...25 МГц удобнее использовать зависимость шумов  $P_{NEP}(f)$ , составленную на основе четырех точек  $P_{NEP}(1)$ ,  $P_{NEP}(3)$ ,  $P_{NEP}(10)$  и  $P_{NEP}(25)$ :

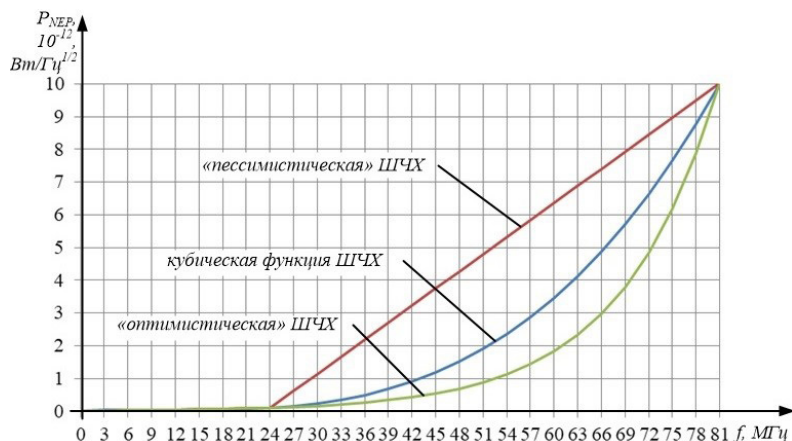


Рис. 2. Аппроксимированные ШЧХ ФПУ: «оптимистическая», «пессимистическая» и на основе кубической функции

$$P_{NEP}(f) = -201 \cdot 10^{-7} f^3 - 75,71 \cdot 10^{-5} f^2 - 27,676 \cdot 10^{-4} f + 9,53 \cdot 10^{-3}. \quad (8)$$

Таким образом, с помощью этой ШЧХ для нужной частоты можно определить уровень шумов  $P_{NEP}(f)$ , соотношение сигнал/шум  $Q$  и рассчитать фазовую погрешность по формуле [15, 16]:

$$\Delta\varphi_{\text{фн}} = \frac{2P_{NEP}}{\pi} \sqrt{\frac{\Delta f_{\text{фны}}}{k_{\text{юс}}}} \quad (9)$$

и, соответственно, с учетом формулы (2), шумовую составляющую погрешности измерения перемещений  $\Delta l_{\text{ш}}$ :

$$l_{\text{ш}} = \frac{\lambda \cdot P_{NEP}}{\pi} \sqrt{\frac{\Delta f_{\text{фны}}}{k_{\text{юс}}}} \quad (10)$$

где  $k_{\text{юс}} = \frac{SP_0^2 \gamma_{\text{св}}^2 \gamma_{\text{оп}} \gamma_{\text{изм}}}{k_{\text{онм}} + 2S}$  — коэффициент юстировки АО ЛИП,  $\Delta f_{\text{фны}}$  — ширина АЧХ ФПУ.

При использовании в ЛИП ФПУ с интегрированным предусилителем FPD310-FV (MenloSystems) с  $P_{NEP} = 30 \cdot 10^{-12}$  Вт·Гц<sup>-1/2</sup> разрешающая способность составила  $\Delta l_{\text{рс}} = 1,1$  нм [9]. Полученное значение пропорционального соотношения  $P_{NEP} - \Delta l_{\text{рс}}$  согласно формуле (10), позволяет получить оценки составляющей погрешности измерения от шумов ФПУ  $\Delta l_{\text{ш}}$  и для других значений  $P_{NEP}$ , используя это выражение (табл. 1):  $\Delta l_{\text{ш}}(1) = 0,27$  пм,  $\Delta l_{\text{ш}}(3) = 0,27$  пм,  $\Delta l_{\text{ш}}(10) = 1,35$  пм,  $\Delta l_{\text{ш}}(25) = 3,61$  пм для ФПУ А-CUBE-S-500-01, А-CUBE-S-500-03, А-CUBE-S-500-10, А-CUBE-S-500-25 соответственно и  $\Delta l_{\text{ш}}(80) = 472,22$  пм для ФПУ ОЕ-300-SI-10. И за счет применения формулы (8) для аппроксимированной ШЧХ ФПУ находим значение частоты оптических сигналов для значения  $\Delta l_{\text{ш}} = 1$  пм, составляющее  $\approx 8,5$  МГц. Полученное значение позволяет понять потенциально достижимый технический уровень ЛИП при использовании современных малошумящих кремниевых ФПУ.

1.2.2. Уровень шумов охлаждаемых ФПУ в ИК диапазоне длин волн. Снижение шумов ФПУ возможно при их охлаждении за счет использования охлаждающего элемента Пельтье с термодатчиком для создания системы обратной связи стабилизации температуры фотоприемного кристалла. Как правило, она поддерживается на уровне 200–230 К [29].

Для таких ФПУ приводят т.н. удельную обнаружительную способность  $D^*(\lambda_{\text{max}})$  (в см·Гц<sup>1/2</sup>/Вт), где  $\lambda_{\text{max}}$  — длина волны максимума чувствительности ФПУ [29]. Искомый параметр  $P_{NEP}$  (в Вт/Гц<sup>1/2</sup>) связан с  $D^*(\lambda_{\text{max}})$  и корнем из площади фотоприемного кристалла  $\sqrt{S}$  [30], которая для квадратной его формы равна длине стороны  $l_{\text{кр}}$ :  $\sqrt{S_{\text{кр}}} = l_{\text{кр}}$ , позволяя записать следующее уравнение:

$$P_{NEP} = \frac{\sqrt{S_{\text{кр}}}}{D^*(\lambda_{\text{max}})} = \frac{l_{\text{кр}}}{D^*(\lambda_{\text{max}})}. \quad (11)$$

Тогда погрешность измерения  $\Delta l_{\text{ш}}$  из-за шумов таких охлаждаемых ФПУ примет вид:

$$\Delta l_{\text{ш}} = \frac{\lambda \cdot l_{\text{кр}}}{2\pi^2 \cdot D^*(\lambda_{\text{max}})} \sqrt{\frac{\Delta f}{k_{\text{юс}}}} \quad (12)$$

Расчеты значений  $\Delta l_{\text{ш}}$ , проведенные для нескольких охлаждаемых ФПУ с учетом вышесказанного и их длин волн максимума чувствительности также представлены в табл. 1. Как видно, они не позволяют достичь значений лучше, чем  $\Delta l_{\text{ш}} = 5,5 - 16,7$  пм.

Как видно из результатов приведенных выше расчетов, применение в составе АО ЛИП охлаждаемых ФПУ на основе теллурида ртути кадмия не позволяет достичь более высокой разрешающей способности, чем кремниевых ФПУ. Далее рассматриваются особенности схемотехники АО ЛИП с понижением частоты сигнала за счет двойного гетеродина, под которым понимается фотопреобразование трех входных разночастотных оптических потоков: двух дифракционных E(0) и E(+1) и дополнительного амплитудно-модулированного.

Это двойное снижение частоты дает возможность использовать ФПУ с меньшей частотой сигнала и меньшим уровнем собственных шумов. При этом обсуждаются два типа схемотехники АО ЛИП с постоянным и переменным значением частоты амплитудно-модулированного потока (гетеродина) и, соответственно, с переменной и постоянной значениями частот фотопреобразования.

2. Состав и принцип действия АО ЛИП с двойным гетеродинамированием оптических сигналов на входе ФПУ с фиксированной частотой гетеродина. Один из вариантов АО ЛИП данного типа по схеме с АО модулятором «на входе», работающий с дифракцией света в режиме Брэгга с фор-

Технические характеристики ФПУ для использования в АО ЛИП

| №                        | Модель ФПУ   | Длина волны $\lambda$ , мкм | Частота сигнала, МГц | Размер кристалла, мм | Обнаружительная способность $D^*(\lambda_{\text{max}})$ , $10^9 \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$ | Уровень шумов $P_{\text{шум}}'$ , $10^{-12} \cdot \text{Вт} / \text{Гц}^{1/2}$ | Погрешность <sup>5</sup> , $\Delta I_{\text{ш}}$ , пм |
|--------------------------|--|-----------------------------|----------------------|----------------------|--|--|---|
| <b>Неохлаждаемые ФПУ</b> |  |                             |                      |                      |  |  |   |
| 1                        | A-CUBE-S-500-01 <sup>1</sup>                                       | 0,65                        | 1,00                 | —                    | —  | 0,0075 <sup>1</sup>  | 0,27  |
| 2                        | A-CUBE-S-500-03 <sup>1</sup>                                       | 0,65                        | 3,00                 | —                    | —  | 0,0075 <sup>1</sup>  | 0,27  |
| 3                        | A-CUBE-S-500-10 <sup>1</sup>                                       | 0,65                        | 10,00                | —                    | —  | 0,0375 <sup>1</sup>  | 1,35  |
| 4                        | A-CUBE-S-500-25 <sup>1</sup>                                       | 0,65                        | 25,00                | —                    | —  | 0,100 <sup>1</sup>   | 3,61  |
| 5                        | OE-300-SI-10 <sup>2</sup>  | 0,85                        | 80,00                | —                    | —  | 10,00 <sup>2</sup>   | 472,22  |
| 6                        | PVI-4-1×1-TO39-NW-36 <sup>3</sup>                                  | 3,4                         | 6,70                 | 1×1                  | 40   | 2,50 <sup>5</sup>  | 472,22  |
| 7                        | PVI-5-1×1-TO39-NW-36 <sup>3</sup>                                  | 4,2                         | 6,70                 | 1×1                  | 30   | 3,33 <sup>5</sup>  | 777,78  |
| <b>Охлаждаемые ФПУ</b>   |  |                             |                      |                      |  |  |   |
| 8                        | PVI-2TE-4-I×I-TO8-wAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -36 <sup>3</sup> | 3,5                         | 10,00                | 1×1                  | 400  | 0,250 <sup>5</sup>   | 48,61 <sup>x</sup>                                    |
| 9                        | PVI-2TE-5-1×1-TO8-wAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -36 <sup>3</sup> | 4,2                         | 12,50                | 1×1                  | 200  | 0,500 <sup>5</sup>   | 116,67 <sup>x</sup>                                   |
| 10                       | PV-3TE-3 <sup>3,4</sup>  | 3,0                         | 0,02                 | 0,1×0,1              | 300  | 0,033 <sup>5</sup>   | 5,56 <sup>x</sup>                                     |
| 11                       | PVI-2TE-3 <sup>3,4</sup>   | 3,0                         | 0,02                 | 1×1                  | 900  | 0,111 <sup>5</sup>   | 18,52 <sup>x</sup>                                    |
| 12                       | PVI-3TE-3 <sup>3,4</sup>   | 3,0                         | 0,02                 | 1×1                  | 800  | 0,125 <sup>5</sup>   | 20,83 <sup>x</sup>                                    |
| 13                       | PVI-4TE-3 <sup>3,4</sup>   | 3,0                         | 0,02                 | 1×1                  | 1000   | 0,100 <sup>5</sup>   | 16,67 <sup>x</sup>                                    |
| 14                       | PVIA-2TE-3 <sup>3,4</sup>  | 2,9                         | 0,02                 | 1×1                  | 500  | 0,200 <sup>5</sup>   | 32,22 <sup>x</sup>                                    |

Примечание: 1 — справочные данные взяты из [27];  
 2 — справочные данные взяты из [28];  
 3 — справочные данные взяты из [29];  
 4 — значение параметра дано при частоте оптического сигнала 20 kHz;  
 5 — данные получены расчетным путем по формулам (10), (11).

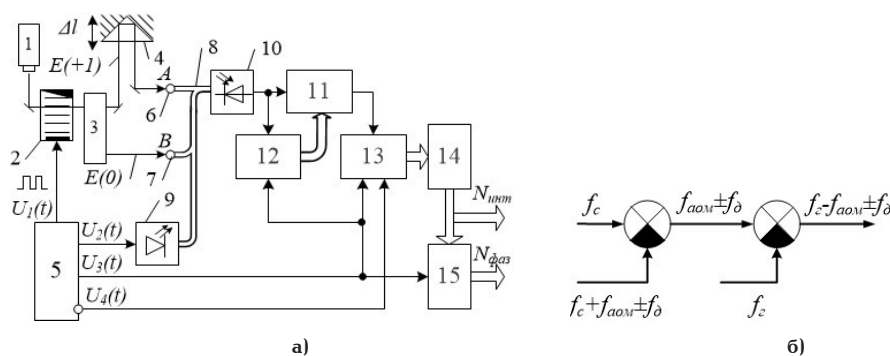


Рис. 3. Схемы АО ЛИП с двойным гетеродинированием оптических сигналов на входе ФПУ: общая измерительная схема (а), эквивалентная схема фотопреобразования

мированием нулевого  $E(0)$  и первого  $E(+1)$  дифракционных порядков, изображен на рис. 3а. На нем обозначены: лазер 1, АО модулятор 2, оптическая схема 3, подвижная трипсель-призма 4, генератор 5, две микролинзы 6 и 7 трехходового волоконно-оптического (ВО) соединителя 8, лазерный излучатель 9, ФПУ 10, фильтр низких частот (ФНЧ) 11 с управляемой внешним сигналом частотой среза

$f_{\text{ФНЧ}}$ , частотный детектор 12, фазовый интерполятор (в дальнейшем — интерполятор) 13, сумматор 14, фазометр малого диапазона (в дальнейшем — фазометр) 15.

Работа измерительной схемы, включающей блоки: ФНЧ 11, частотный детектор 12, интерполятор 13, сумматор 14, фазометр 15 в основе описана в [12–16]. Поэтому далее основное внимание уде-

лено на фотопреобразования оптических сигналов, частотным преобразованием сигналов и метрологическому анализу.

В процессе работы из излучения лазера 1, следующего через АО модулятор 2, возбуждаемого сигналом  $U_1(t) = U_0 \cos 2\pi f_{aom} t$  ( $f_{aom} = \text{const}$ ) с первого выхода генератора 5, формируются первый  $E(+1)$  и нулевой  $E(0)$  разночастотные дифракционные порядки. Они проходят через оптическую систему 3, пространственно в ней разделяются, далее следуя соответственно по маршрутам:

— для потока  $E(+1)$ : смещаемая на  $\Delta l$  с объектом трипель-призма 4 → микролинза 6 (точка А) → первый вход ВО соединителя 8 → ФПУ 10;

— для потока  $E(0)$ : микролинза 7 (точка В) → второй вход ВО соединителя 8 → ФПУ 10.

Возможность и условия использования оптических волокон в АО ЛИП ранее уже были рассмотрены в [12–14].

Кроме того, оптический поток от лазерного излучателя 9 по сигналу  $U_2(t) = U_0 \cos 2\pi f_r t$  (где  $f_r = f_{aom}/n$ ,  $n$  — коэффициент пропорциональности) со второго выхода генератора 5 амплитудно-модулированный с частотой  $f_r$  подается на вход третьего входа ВО соединителя 8 и также следует ФПУ 10.

Первый  $E(+1)$  и нулевой  $E(0)$  дифракционные оптические потоки интерферируют на оптическом входе ФПУ 10, осуществляя первое гетеродинирование, формируя бегущую интерференционную картину с разностной частотой  $f_{aom} \pm f_{gon}$ , где  $f_{gon}$  — доплеровский набег частоты, возникающий от смещаемой на  $\Delta l$  с объектом трипель-призмы 4. Бегущая интерференционная картина с частотой  $f_{aom} \pm f_{gon}$  и оптический поток амплитудно-модулированный с частотой  $f_r$  освещают ФПУ 10, который фотопреобразует их в выходной электрический сигнал разностной частоты  $f_{aom} - f_r \pm f_{gon}$ , осуществляя второе гетеродинирование. При этом производится перенос фазового набега  $\Delta\phi(\Delta l)$  от смещения  $\Delta l$  трипель-призмы 4 на разностную частоту  $f_{aom} - f_r$ , позволяя понизить ее до нужного значения. Эквивалентная схема частотных преобразований АО ЛИП показана на рисунке 3б ( $f_c$  — частота света).

### 2.1. Особенности двойного гетеродинирования.

В рассматриваемом АО ЛИП заложено фотоэлектрическое преобразование разных по физической природе оптических сигналов: двух пространственно совмещенных разночастотных интерферирующих оптических потоков  $E(0)$  и  $E(+1)$  и амплитудно-модулированного оптического потока, формируемого лазерным излучателем 9. Частотные преобразования спектров сигналов показаны на рис. 4.

Для последующего анализа примем следующее допущение. Частота света  $f_{c2}$  (длина волны  $\lambda_2$ ) одномодового лазерного излучателя 9 отличается от частоты света  $f_{c1}$  (длины волны  $\lambda_1$ ) лазера 1 на значение, существенно превышающее максимальную частоту работы ФПУ 10

$$\begin{aligned} \Delta f_\lambda &= f_{c2} - f_{c1} = \frac{c}{\lambda_2} - \frac{c}{\lambda_1} = \\ &= \frac{c(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_2 \lambda_1} \gg \Delta f_{fny}, \end{aligned} \quad (13)$$

чтобы влиянием разностной частоты лазеров  $\Delta f_\lambda$  можно было пренебречь.

Итак, пройдя каждый по своему вышеописанному маршруту, на входе ФПУ 10 интерферируют два разночастотных дифракционных порядка  $E(0)$  и  $E(+1)$  (рис. 4а):

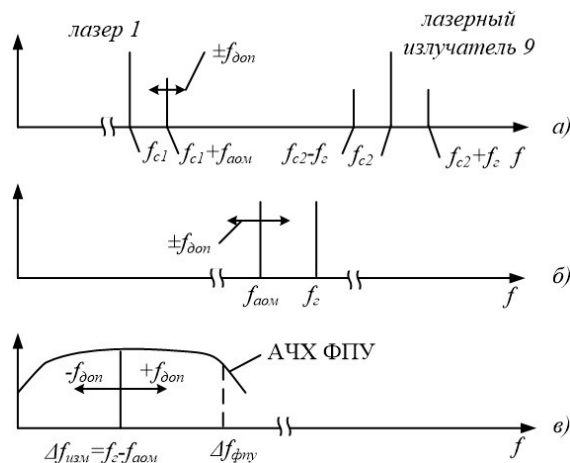


Рис. 4. Общий вид спектров сигналов: спектры оптических сигналов на входе ФПУ 10 (а), спектры сигналов после первого гетеродинирования (б), спектры сигналов после второго гетеродинирования (в)

$$E(0) = E_0 \exp[i2\pi f_{c1} t], \quad (14)$$

$$E(+1) = E_0 \exp[i2\pi(f_{c1} + f_{aom} \pm f_{gon}) t]. \quad (15)$$

Пространственное совмещение двух оптических потоков  $E(0)$  и  $E(+1)$  приводит к образованию бегущей интерференционной картины, освещающей ФПУ 10, амплитуда  $A_{интм}^2$  которой равна:

$$A_{интм}^2 = A_0^2 + A_1^2 + 2A_0 A_1 \cos[2\pi(f_{aom} \pm f_{gon}) t]. \quad (16)$$

Так как интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды ( $I \sim A^2$ ), то выражение для формируемого фототока можно привести к виду (рис. 4б):

$$I_{интм} = I_0 + I_1 + 2\sqrt{I_0 I_1} \cos[2\pi(f_{aom} \pm f_{gon}) t], \quad (17)$$

где  $I_{интм}$  — результирующая интенсивность интерферирующей картины,  $I_0$  и  $I_1$  — интенсивности пространственно совмещенных оптических потоков.

Помимо вышеупомянутых двух оптических потоков  $E(0)$  и  $E(+1)$  на вход ФПУ также поступает амплитудно-модулированная световая волна (рис. 4а):

$$E_r(t) = E_0(1 + M \cos 2\pi f_r t) \cos 2\pi f_{c2} t, \quad (18)$$

где  $f_{c2}$  — частота света лазерного излучателя 9,  $M$  — коэффициент амплитудной модуляции.

Выходной сигнал ФПУ 10 от фотопреобразования этого сигнала совпадает с огибающей входного амплитудно-модулированного оптического сигнала:

$$\begin{aligned} U_r(t) &= k_{ам} U_0 (1 + M \cos 2\pi f_r t) = \\ &= k_{ам} U_0 + k_{ам} U_0 M \cos 2\pi f_r t. \end{aligned} \quad (19)$$

С учетом суперпозиции двух разночастотных сигналов (17) и (19), формируемая переменная составляющая на выходе ФПУ 10 на разностной частоте между частотой АО модуляции  $f_{aom}$  и частотой генератора  $f_r$  примет вид (рис. 4в):

$$U_r(t) = N \cos 2\pi(f_r - f_{aom} \pm f_g) t, \quad (20)$$

где  $N$  — коэффициент пропорциональности.

Полученное выражение отражает процесс формирования сигнала разностной частоты трех оптических потоков с переносом доплеровского набега частоты  $f_{гон}$  и фазового набега от смещений  $\Delta l$  объекта 4.

Для обеспечения равенства скоростей контролируемых смещений в обоих направлениях значение разностной частоты измерительного сигнала  $f_{изм}$  следует выбрать равной половине ширине АЧХ ФПУ 10  $f_{гон} = f_{изм} = f_{фны}/2$ :

$$\begin{aligned} f_{гон} = f_{изм} &= \frac{\Delta f_{фны}}{2} = f_r - f_{аом} = \\ &= n_q \cdot f_{аом} - f_{аом} = f_{аом}(n_q - 1), \end{aligned} \quad (21)$$

где  $n_q$  — частотный коэффициент.

С учетом этого значение  $n$  определяется с помощью выражения:

$$n_q = \frac{\Delta f_{фны} + 2f_{аом}}{f_{аом}}. \quad (22)$$

Таким образом, использование формул (21) и (22) позволяет связать частотные параметры АО ЛИП, а именно ширину АЧХ ФПУ 10, частоту АО модуляции  $f_{аом}$ , доплеровский сдвиг частоты  $f_{гон}$  и частоту генератора  $f_r$ .

2.2. Влияние эффективности фильтрации измерительного сигнала на разрешающую способность АО ЛИП. В процессе фильтрации ФНЧ 11 измерительного сигнала на этапе второго гетеродинарования выделяется полезный сигнал на частоте  $f_{аом} - f_r \pm f_{гон}$  и подавляются более высокие частоты  $f_{аом} \pm f_{гон}$  и  $f_r$ .

Однако любая фильтрация неидеальна и в полезном сигнале остаются вредные составляющие подавленных частот  $f_{аом} \pm f_{гон}$  и  $f_r$ , которые, подобно шуму, ограничивают разрешающую способность. Поэтому для определения составляющей погрешности важно рассчитать уровень подавленного сигнала  $U_{nc}$  после фильтрации.

В соответствии с этим можно записать выражение для фазовой погрешности

$$\Delta\varphi_\phi = \frac{1}{\pi \sqrt{\frac{U_c}{U_{nc}}}} \quad (23)$$

и, соответственно, составляющую погрешности от фильтрации сигнала

$$\Delta\varphi_\phi = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{\lambda}{4\pi^2} \sqrt{\frac{U_c}{U_{nc}}}. \quad (24)$$

Исследование частотных параметров в основном близко к анализу уровней шума, т. к. связано с определением соотношения уровня полезного сигнала  $U_c$  к уровню подавленного сигнала  $U_{nc}$  после фильтрации  $U_c/U_{nc}$ , влияющего на разрешающую способность. При этом ФПУ с ограниченным частотным диапазоном удобно рассмотреть в виде последовательного соединения ФПУ с бесконечной АЧХ и встроенным ФНЧ в соответствии с эквивалентной схемой (рис. 5).

Большую селективность (120 дБ на декаду) дает двухзвенный фильтр, составленный из двух после-



Рис. 5. Эквивалентная схема ФПУ, включающая операции фотопреобразования и фильтрации низких частот

довательно включенных П-образных звеньев [31]. При его использовании формула для соотношения сигнал/подавленный сигнал  $U_c/U_{nc}$  равна:

$$\frac{U_c}{U_{nc}} = 10^{6 \lg \frac{f_r}{f_{фны}}} \quad (25)$$

(при условии, что  $f_r > f_{аом}$ ):

$$\Delta l_\phi = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi_\phi}{2\pi} = \frac{\lambda}{4\pi^2} \sqrt{10^{6 \lg \frac{f_r}{f_{фны}}}}. \quad (26)$$

В соответствии с этой формулой были рассчитаны значения разрешающей способности АО ЛИП  $\Delta l_\phi$ , определяемой влиянием фильтрации сигналов, от частоты АО модуляции  $f_{аом}$  для двух групп значений: 0,5; 1,0; 3,0 МГц и 10, 25 МГц соответственно. На рис. 6 и 7 изображены зависимости погрешности измерений АО ЛИП  $\Delta l_\phi$  от частоты АО модуляции  $f_{аом}$ : для 0,5; 1,0 и 3,0 МГц, а также 10 и 25 МГц соответственно.

Согласно [32], диапазон измерений для прецизионного высокочастотного фазометра составляет  $\Delta l_{quan} = 1$  нм, что для фазовых измерений можно записать формулой

$$\Delta\varphi_{quan} = \frac{2\Delta l_{quan}}{\lambda}. \quad (27)$$

И тогда для  $\lambda = 0,63$  мкм получаем  $\Delta\varphi_{quan} = 3,2 \cdot 10^{-3}$  рад.

Для вышеупомянутого фазометра в качестве оценки погрешности измерений можно использовать уровень собственных шумов фазометра, достигающих уровня  $\delta\varphi_{ш} \approx 2\pi \cdot 10^{-7}$  рад.

$$\begin{aligned} \Delta l_{\phi аз} &= \frac{\lambda \delta\varphi_{ш}}{2} = \frac{0,63 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 10^{-7}}{2} = \\ &= 0,2 \cdot 10^{-12} = 0,2 \text{ пм}. \end{aligned}$$

Как видно, погрешность измерений фазометра не превышает 0,2 пм.

Выражение для разрядности фазометра в двоичном коде  $n$  имеет вид

$$2^n = \frac{\Delta\varphi_{quan}}{\delta\varphi_{ш}}. \quad (28)$$

Тогда  $n$  можно определить по формуле:

$$n = \left\lceil \log_2 \frac{\Delta\varphi_{quan}}{\delta\varphi_{ш}} \right\rceil. \quad (29)$$

Подставляя вышеприведенные рассчитанные значения  $\Delta\varphi_{quan}$  и  $\delta\varphi_{ш}$  в формулу (29), получаем исковую разрядность фазометра, равную  $n = 13$ .

Пример 1. Рассчитаем параметры АО ЛИП со следующими параметрами. В составе АО ЛИП

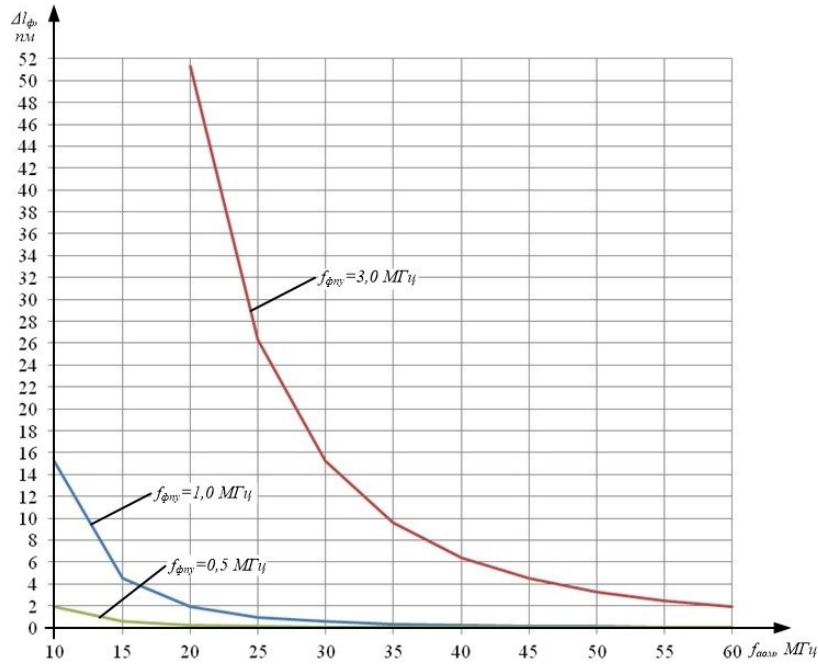


Рис. 6. Зависимости погрешности фильтрации  $\Delta I_{\phi}$  от частоты АО модуляции  $f_{ом}$  для трех значений  $f_{фн}$ : 0,5; 1,0 и 3,0 МГц

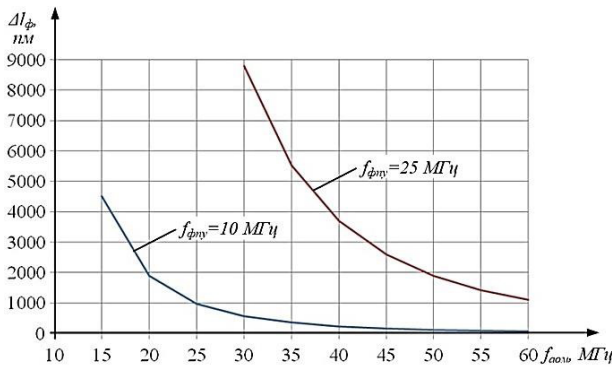


Рис. 7. Зависимости погрешности фильтрации  $\Delta I_{\phi}$  от частоты АО модуляции  $f_{ом}$  для трех значений  $f_{фн}$ : 10 и 25 МГц

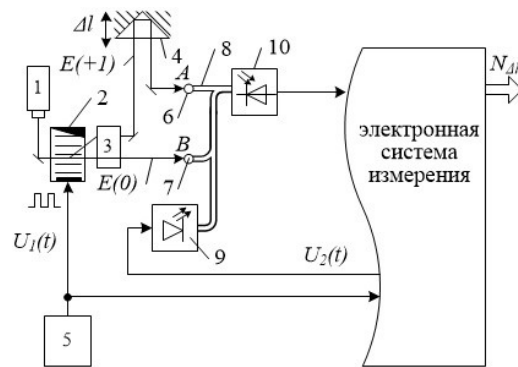


Рис. 8. Схема АО ЛИП с двойным гетеродинамированием оптических сигналов на входе ФПУ с автоподстройкой частоты генератора сигналом  $U_2(t)$

используется ФПУ 10 модели A-CUBE-S1500-10 [27] с АЧХ от 0 до 10 МГц.

Допустим, на вход АО модулятора поступает сигнал с частотой  $f_{ом} = 40$  МГц. После пространственного совмещения разночастотных порядков  $E(0)$  и  $E(+1)$  на входе ФПУ 10 формируется бегущая интерференционная картина с частотой  $f_{ик} = f_{ом} \pm f_{гон} = 40 \text{ МГц} \pm f_{гон}$ . Лазерный излучатель 8 по сигналу от кварцевого генератора 5 формирует амплитудно-модулированный оптический сигнал частотой  $f_r = 45$  МГц. Тогда после двойного гетеродинамирования ФПУ 10 формируется выходной сигнал на разностной частоте  $f_{изм} = f_r - f_{ик} = f_r - f_{ом} \pm f_{гон} = 45 - 40 \pm f_{гон} = 5 \text{ МГц} \pm f_{гон}$ . С учетом того, что АЧХ ФПУ 10 составляет от 0 до 10 МГц, соответствуя  $\Delta I_{из} = 1,35$  нм, а также  $f_{гон} = 5$  МГц, соответствуя скорости перемещений  $\approx 1,58$  м/с.

**3. АО ЛИП с двойным гетеродинамированием оптических сигналов на входе ФПУ с автоподстройкой частоты генератора.** Основная особенность данного технического решения заключается в уравновешивании входного сигнала «по частоте» или «по фазе». Это позволяет реализовать частот-

ную автоподстройку частоты (ЧАПЧ) или фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ) [33], последняя из которых является наиболее интересным и перспективным направлением.

Схема АО ЛИП с двойным гетеродинамированием оптических сигналов на входе ФПУ и ФАПЧ генератора в упрощенном виде изображена на рис. 8. Его состав почти полностью аналогичен АО ЛИП, изображенной на рис. 3. Сигнал  $U_1(t) = U_0 \cos 2\pi f_{ом} t$  формируется генератором 5, а управляющий сигнал  $U_2(t) = U_0 \cos 2\pi f_r t$ , согласно схеме, подводится извне, от электронной системы измерения. В этом АО ЛИП процесс измерений искомого фазового набега и, соответственно, перемещений объекта осуществляется в цифровом виде, например, встроенным высокочастотным прецизионным фазометром, подобно [30].

В связи с тем, что при реализации ФАПЧ для данного АО ЛИП частоты входных сигналов фазового детектора 11  $U_{фн}(t)$  и  $U_3(t)$  равны, то основное уравнение можно записать в виде:

$$f_{ом} \pm f_{гон} - f_r = f_3. \quad (30)$$

В соответствии с ним частота  $f_3$  может быть уменьшена до малых значений, на уровне 20 кГц ... 1 МГц для использования ФПУ с минимальным уровнем шумов, обеспечивая уравнивание входного сигнала, снимая существенные ограничения максимальной скорости контролируемых смещений объекта  $v_{gb}$ .

Тем не менее погрешность измерений, как и ранее, будет ограничиваться уровнем шумов ФПУ 10, но для более низкой частоты фотопреобразования. И это ограничивает скорость нарастания выходного сигнала  $\Delta U_{f_{\text{вых}}}/\Delta t$ , то, соответственно, определяет значение максимального ускорения (или торможения) движений объекта  $\Delta v_{gb}/\Delta t$ . Такое ограничение является ценой стремления уменьшения шумовой составляющей погрешности измерений  $\Delta I_u$ .

Пример 2. Анализ данного технического решения в основном подобен примеру 1, отличаясь лишь тем, что подбором параметров АО ЛИП в режиме работы ФАПЧ значение разностной частоты можно снизить, например, до  $\approx 1$  МГц. Тогда при использовании кремниевого ФПУ А-CUBE-S-500-01 разрешающая способность, определяемая шумами, будет не больше  $\Delta I_u \approx 0,27$  пм.

### Заключение

1. Освещение входа ФПУ тремя световыми пучками, а именно двумя интерферирующими разностными дифракционными порядками  $E(+1)$  и  $E(0)$  и амплитудно-модулированным оптическим потоком позволяет реализовать двойное гетеродинирование. Этот прием позволяет перенести фазовый набег  $\Delta\phi$ , формирующийся от смещений объекта  $\Delta l$ , на более низкую рабочую частоту потоков и обеспечить частотное согласование АО модулятора и генератора с АЧХ ФПУ.

2. Двойное гетеродинирование в АО ЛИП может быть осуществлено с фиксированным значением частоты генератора или её автоподстройкой. В первом случае частота измерительного сигнала при разных скоростях смещений объекта, образующегося при фотопреобразовании, является переменной, изменяя уровень шумов ФПУ согласно его ШЧХ. Во втором случае частота измерительного сигнала является постоянной, снижая значение которой можно достичь максимальной разрешающей способности АО ЛИП без ограничения максимальной скорости контролируемых смещений объекта  $v_{gb}$ .

3. В АО ЛИП с двойным гетеродинированием появляется дополнительная составляющая погрешности измерений, определяемая фильтрацией сигналов в измерительном канале, которая для достижения высокой разрешающей способности накладывает дополнительные ограничения на соотношения частот сигналов.

### Библиографический список

1. Cui J., Zhang P., Chen K. Laser displacement measuring device and method. CN patent 113358037; filed August 10th, 2021; published November 09th, 2021.
2. Li Y., Jin G., Luo Z. [et al.]. Equal-arm-length heterodyne laser interferometry ranging system. CN patent 103307985; filed June 09th, 2013; published April 13th, 2016.
3. Bai Y., Li Z., Lu Y. F. [et al.]. Laser heterodyne interferometric apparatus and method based on plane mirror. US patent 10907950; filed May 02th, 2018; published February 02th, 2021.
4. 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.

5. Игнатов С. А., Цибизов П. Н. Лазерные измерительные системы с пространственно-временной разверткой интерференционного поля // Датчики и системы. 2005. № 10. С. 17–19.
6. Цибизов П. Н. Пространственно-временная развертка интерференционного поля в лазерных измерительных системах // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2015. № 3 (15). С. 174–179.
7. Капезин С. В., Базыкин С. Н., Базыкина Н. А. [и др.]. Лазерные измерительные системы с пространственно-временной разверткой интерференционного поля // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2015. № 2 (34). С. 156–161.
8. Пат. 2645005, Российская Федерация, МПК G 01 B 9/02, G 02 F 1/11. Лазерный интерферометр / Телешевский В. И., Гришин С. Г., Бушуев С. В. № 2016145287; заявл. 18.11.16; опубл. 15.02.18, Бюл. № 5.
9. Гришин С. Г. Гетеродинамная лазерная интерференционная система для измерения линейных перемещений с анизотропным акустооптическим преобразованием частоты света: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2012. 200 с.
10. Teleshevsky V. I., Grishin S. G. Digital transformations of the phase measurement information in the high resolution heterodyne laser interferometry // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2008. Vol. 7006. P. 70060E-1–70060E-7. DOI: 10.1117/12.802270.
11. Grishin S. G. Estimating phase errors in heterodyne laser interferometer measurement systems // Measurement Techniques. 2011. Vol. 54, № 8. P. 865–868. DOI: 10.1007/s11018-011-9818-5.
12. Леун Е. В. Повышение быстродействия и разрешающей способности акустооптических гетеродинамных лазерных интерферометров перемещений. Адаптивный лазерный интерферометр // Омский научный вестник. 2020. № 3 (171). С. 92–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-92-98.
13. 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.
14. Леун Е. В. Особенности схемотехники акустооптических лазерных измерительных систем для контроля трехкоординатных (3D) перемещений изделий и элементов оборудования. Часть 2 // Омский научный вестник. 2021. № 6 (176). С. 52–58. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-52-58.
15. Леун Е. В. К вопросу достижения субпикометрической разрешающей способности акустооптическим двухканальным лазерным интерферометром перемещений с двумя разностными фотоприемниками // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 110–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-110-118.
16. Leun E. V. Features of an acousto-optical two-channel laser displacement interferometer with multi-frequency photodetectors with subpicometer resolution // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2182. 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012008.
17. Jingya Q., Wang Z., Junhui H. [et al.]. Laser heterodyne interferometer for simultaneous measurement of displacement, and roll-angle based on the acousto-optic modulators // Optical Micro- and Nanometrology VII. Proceedings. 2018. Vol. 10678. DOI: 10.1117/12.2307316.
18. Lawall J., Kessler E. Michelson interferometry with 10 pm accuracy // Rev. Sci. Instrum. 2000. Vol. 71. P. 2669–2676. DOI: 10.1063/1.1150715.
19. Pisani M. A homodyne Michelson interferometer with subpicometer resolution // Measurement Science and Technology. 2009. Vol. 20. 084008. DOI: 10.1088/0957-0233/20/8/084008.
20. Libbrechta K. G., Blackb E. D. A basic Michelson laser interferometer for the undergraduate teaching laboratory demonstrating picometer sensitivity // American Journal of Physics. 2014. Vol. 83 (5). DOI: 10.1119/1.4901972.



21. Isleif K.-S., Heinzel G., Mehmet M., Gerberding O. Compact multifringe interferometry with subpicometer precision // *Physical Review Applied*. 2019. Vol. 12 (3). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.12.034025.

22. Arablu M., Smith S.T. Polydyne displacement interferometer using frequency-modulated light // *Review of Scientific Instruments*. 2018. Vol. 89. 055007. DOI: 10.1063/1.5026569.

23. Epsom представляет кварцевые генераторы серии E с ультранизким джиттером. URL: <https://www.rlocman.ru/news/new.html?di=535863> (дата обращения: 16.04.2022).

24. Datasheet for LMK5B12204 Ultra-Low Jitter Network Synchronizer Clock With Two Frequency Domains // Texas Instruments. URL: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmk5b12204.pdf?ts=1650838239552&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLMK5B12204](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmk5b12204.pdf?ts=1650838239552&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLMK5B12204) (дата обращения: 14.04.2022).

25. Каталог // Crystek Corporation. URL: <http://www.radiocomp.ru/joom/images/storage/docs/brochure/Crystek2016www.pdf> (дата обращения: 25.03.2022).

26. Управляемый напряжением ПАВ-генератор от Vectron с чрезвычайно низким джиттером. URL: <http://radiocomp.ru/joom/ru/component/content/article/7-novosti/481-upravlyаемyj-napryazheniem-pav-generator-ot-vectron-s-chrezvychajno-nizkim-dzhitterom> (дата обращения: 11.04.2022).

27. Datasheet for model 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](https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Datasheets/lc-electronics/a-cube.pdf&no_cache=1) (дата обращения: 25.04.2021).

28. Datasheet for model OE-300-SI-30. [https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user\\_upload/home/Datasheets/femto/photoreceiver/oe-300-si-30.pdf&no\\_cache=1](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: 15.04.2022).

29. Каталог VIGO system 2020–2021. URL: [https://z7r8z4w7.stackpathcdn.com/wp-content/uploads/2021/03/VIGO\\_katalog\\_2020-2021-LQ-1.pdf](https://z7r8z4w7.stackpathcdn.com/wp-content/uploads/2021/03/VIGO_katalog_2020-2021-LQ-1.pdf) (дата обращения: 15.04.2022).

30. Детекторы от компании Thorlabs. URL: [https://azimp.ru/articles/tech/39400/?sphrase\\_id=176822](https://azimp.ru/articles/tech/39400/?sphrase_id=176822) (дата обращения: 15.04.2022).

31. Трансиверы прямого преобразования. URL: <https://pandia.ru/text/80/439/55898-13.php> (дата обращения: 15.04.2022).

32. Гончаренко А. М., Жмудь В. А. Прецизионный высокочастотный фазометр для измерений нановибраций // Сбор-

ник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2009. № 1 (55). С. 92–98.

33. Жилин Н. С. Принципы фазовой синхронизации в измерительной технике. Томск: Радио и связь, 1989. 383 с.

**ЛЕУН Евгений Владимирович**, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», Московская область, г. Химки.

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

Адрес для переписки: [stankin1999@mail.ru](mailto:stankin1999@mail.ru)

**ШАХАНОВ Александр Евгеньевич**, кандидат технических наук, начальник отдела АО «НПО Лавочкина», Московская область, г. Химки.

SPIN-код: 2918-9632

AuthorID (РИНЦ): 916667

Адрес для переписки: [SHakhanovAE@laspace.ru](mailto:SHakhanovAE@laspace.ru)

**САМОЙЛОВ Сергей Юрьевич**, кандидат технических наук, ведущий специалист АО «НПО Лавочкина», Московская область, г. Химки.

SPIN-код: 5214-1450

AuthorID (РИНЦ): 921563

Адрес для переписки: [khsm@laspace.ru](mailto:khsm@laspace.ru)

**КОЛОБОВ Анатолий Юрьевич**, кандидат технических наук, главный специалист АО «НПО Лавочкина», Московская область, г. Химки.

SPIN-код: 2286-8790

AuthorID (РИНЦ): 347762

Адрес для переписки: [KolobovAIU@laspace.ru](mailto:KolobovAIU@laspace.ru)

#### Для цитирования

Леун Е. В., Шаханов А. Е., Самойлов С. Ю., Колобов А. Ю. Основы совершенствования схемотехники высокоточных быстродействующих акустооптических лазерных интерферометров перемещений с учетом частотного согласования составляющих блоков и двойного гетеродинамирования на этапе фотопреобразования // *Омский научный вестник*. 2022. № 3 (183). С. 108–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-108-116.

Статья поступила в редакцию 10.04.2022 г.

© Е. В. Леун, А. Е. Шаханов, С. Ю. Самойлов, А. Ю. Колобов