

К ВОПРОСУ ДОСТИЖЕНИЯ СУБПИКОМЕТРИЧЕСКОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АКУСТООПТИЧЕСКИМ ДВУХКАНАЛЬНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ДВУМЯ РАЗНОЧАСТОТНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ

В статье рассматриваются акустооптический (АО) гетеродинный лазерный интерферометр перемещений (ЛИП) с двумя разночастотными фотоприемниками: высокочастотным (ВЧ) и низкочастотным (НЧ) малолуминым, работающими с «быстрым грубым» и «медленным точным» измерительными каналами соответственно.

Описан режим работы АО ЛИП при старт-стопных циклических движениях объектов, обеспечивающий высокую разрешающую способность на начальных и финишных этапах перемещений с малыми скоростями движения. Проведен метрологический анализ «медленного точного» канала с учетом шумовой частотной характеристики фотоприемников с формированием т.н. ее «оптимистического» и «пессимистического» вариантов. На основе проведенного метрологического анализа определены частотные диапазоны сигнала, позволяющие на малых скоростях движения достичь разрешающей способности АО ЛИП субпикометрических значений.

Ключевые слова: лазерный интерферометр перемещений, система фазовой автоподстройки частоты, акустооптический модулятор, шумы фотоприемника, джиттер сигнала, пикометр, фазометр малого диапазона.

Введение. Для высокоточного контроля смещений изделий активно используют лазерные интерферометры перемещений (ЛИП) [1–10]. К настоящему времени разрешающая способность перспективных ЛИП для использования при контроле параметров формы высокоточных зеркал космических радиотелескопов, а также в микроэлектронике, микробиологии, ядерной физике, зондовой микроскопии, нанотехнологиях и других направлениях уже достигает уровня пикометрических значений [7–9].

Одними из наиболее перспективных можно считать ЛИП с акустооптической (АО) модуляцией оптического потока [11–20]. Несколько лет назад было предложено измерять перемещения с помощью АО ЛИП в два этапа «быстрыми грубыми» и «медленными точными» измерениями с применением двух измерительных каналов (в дальнейшем — каналы) на основе фазового интерполятора и системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с фазометром малого диапазона (в дальнейшем — фазометр) соответственно. Использование «медленного точного» канала при одноименных измерениях позволяет сужать спектр шумов фотоприемника, тем самым повышая разрешающую способность АО ЛИП [18–20].

Следующий шаг совершенствования заключается в переходе от одного к двум используемым независимым фотоприемникам: высокочастотному (ВЧ) и малолуминному низкочастотному (НЧ) для работы с «быстрым грубым» и «медленным точным» каналами соответственно.

Как следует из [18–20], максимальная разрешающая способность АО ЛИП $\Delta l_{\text{лип}}$ определяется в режиме «медленных точных» измерений, как минимум, двумя параметрами $\Delta l_{\text{фн}}$ и $\Delta l_{\text{гж}}$, зависящими от уровня шумов НЧ фотоприемника и джиттера генератора, управляемого напряжением (ГУН) системы ФАПЧ соответственно. Они по-разному зависят от частоты сигнала. Так шумы фотоприемника имеют нелинейную шумовую частотную характеристику (ШЧХ), а составляющая $\Delta l_{\text{гж}}$ пропорциональна частоте сигнала. Кроме того, для использования в АО ЛИП могут использоваться АО модуляторы с разной частотой АО модуляции $f_{\text{аом}}$. Поэтому для высокоточных АО ЛИП и блоков, используемых в них, важно определить частотный диапазон $[f_1; f_2]$, при котором разрешающая способность $\Delta l_{\text{лип}}$ с учетом требований современных технологий, имеет субпикометрические значения:

$$\Delta l_{\text{лип}}[f_1; f_2] \leq 10^{-12} \text{ м.} \quad (1)$$

Существующие в открытой печати публикации недостаточно раскрывают эти вопросы, и данная статья направлена на восполнение этого недостатка.

1. Состав и принцип действия ЛИП с двумя разночастотными фотоприемниками.

Для исследования особенностей АО ЛИП с разночастотными фотоприемниками для достижения высокой разрешающей способности далее последовательно рассмотрены вопросы состава, особенностей принципа действия и влияния шумов фотоприемников на характеристики каналов ЛИП.

Итак, один из вариантов ЛИП по схеме с АО модулятором «на входе», работающим с дифракцией света в режиме Брэгга, изображен на рис. 1, на котором обозначены: лазер 1, АО модулятор 2, оптическая схема 3, подвижная трипель-призма 4, две микролинзы 5 и 6 для двух Y-образных волонно-оптических (ВО) разветвителей 7 и 8, ВЧ фотоприемник 9, НЧ фотоприемник 10, фазовый интерполятор (в дальнейшем — интерполятор) 11, система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) 12, сумматор 13, фазометр 14. В статье рассматривается классическая система ФАПЧ, основанная на замкнутом кольце последовательно включенных фазового детектора, фильтра низких частот (ФНЧ) и генератора, управляемого напряжением (ГУН).

Фотоприемник 10, система ФАПЧ 12, фазометр 14, а также фотоприемник 9, интерполятор 11 и сумматор 13 образуют «медленный точный» и «быстрый грубый» каналы ЛИП соответственно.

В процессе работы из излучения лазера 1, следующего через АО модулятор 2, формируются первый $E(+1)$ и нулевой $E(0)$ разночастотные дифракционные порядки, которые проходят через оптическую систему 3, пространственно в ней разделяются и далее следуют соответственно по маршрутам:

- смещаемая с объектом трипель-призма 4 → микролинза 5 (точка А) → ВО Y-образный разветвитель 7 → ВЧ фотоприемник 9 (точка С);
- микролинза 6 (точка В) → ВО Y-образный разветвитель 8 → НЧ фотоприемник 10 (точка D).

Возможность и условия использования оптических волокон в АО ЛИП ранее уже были рассмотрены в [19–20].

На оптических входах С и DVЧ фотоприемника 9 и НЧ фотоприемника 10 интерферируют нулевой $E(0)$ и первый $E(+1)$ дифракционные оптические потоки соответственно, а формируемые ими электрические сигналы поступают на последовательно соединенные интерполятор 11 с сумматором 13 и систему ФАПЧ 12 с фазометром 14.

Первая пара в виде последовательно соединенных интерполятора 11 и сумматора 13 образует «быстрый грубый» канал, а вторая пара в виде системы ФАПЧ 12 с фазометром 14 — «медленный точный» канал. Подробная работа каналов описана в [18–20].

С учетом двух разных АЧХ фотоприемников (рис. 2а) весь цикл перемещений контролируемого объекта $[0; t_{\text{изм}}]$ (рис. 2б) состоит из движения с высокой (и максимально возможной) разрешающей способностью $\Delta l_{\text{инт}}$ с низкой скоростью, не превышающих заданный уровень v_1 : $v \leq v_1$ на этапах разгона $[0; t_1]$ и торможения $[t_2; t_{\text{изм}}]$ и высокоскоростного движения $[t_1; t_2]$ при $v_1 < v \leq v_{\text{макс}}$, где $v_{\text{макс}}$ — максимальная скорость движений. «Медленный точный» канал применяется на этапе низкоскоростных движений, а динамические возможности «быстрого грубого» канала позволяют использовать в течение всего цикла перемещений.

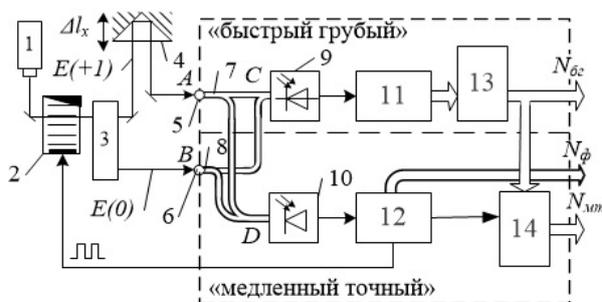


Рис. 1. Схема АО ЛИП с двумя разночастотными фотоприемниками

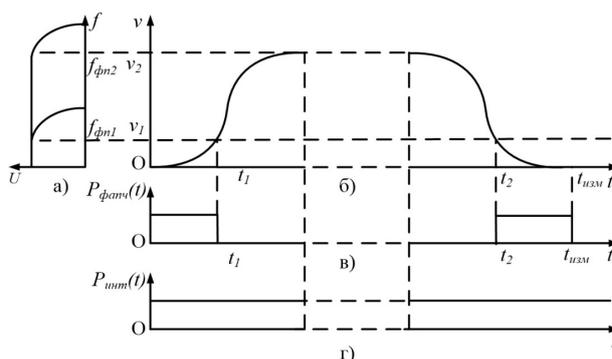


Рис. 2. Диаграммы, поясняющие режим работы ЛИП при старт-стопных перемещениях: АЧХ двух разночастотных фотоприемников (а), скорость объекта (б), работа системы ФАПЧ в дискретном режиме (в) и постоянная работа интерполятора (г)

Такой двухэтапный режим работы можно записать с помощью функций Хэвисайда $1(t)$:

— для «медленного точного» канала без учета переходного процесса (рис. 2в):

$$P_{\text{фач}} = 1(t) - 1(t-t_1) + 1(t-t_2) - 1(t-t_{\text{изм}}); \quad (2)$$

— для «быстрого грубого» канала (рис. 2г):

$$P_{\text{инт}} = 1(t). \quad (3)$$

2. Анализ режимов работы каналов ЛИП. В соответствии с вышеприведенным описанием работа ЛИП с двумя разночастотными фотоприемниками основана на функционировании двух каналов: «быстрого грубого» и «медленного точного». Особенности их работы рассмотрены далее. Однако основное внимание сосредоточено на метрологическом анализе «медленного точного», в частности, рассмотрения возможности достижения его субмикрометрической разрешающей способности, т.е. менее 1 нм.

2.1. Анализ режимов работы «быстрого грубого» канала.

Работа «быстрого грубого» канала основана на работе фазового интерполятора и осуществляется путем подсчета долей порядков интерференции с разрешающей способностью Δl_{pc} , которая определяется выражением [18]:

$$\Delta l_{\text{pc}} = \frac{\lambda}{2k_{\text{инт}}} = \frac{\lambda}{2^{N_{\text{инт}}+1}}, \quad (4)$$

где $k_{\text{инт}} = 2^{N_{\text{инт}}}$, а $k_{\text{инт}}$ и $N_{\text{инт}}$ — коэффициент интерполяции и разрядность интерполятора, где λ —

длина волны лазера. Так, при $\Delta l_{pc} = \lambda/64 \approx 0,01$ мкм нужно 16 каналов измерения [18], но современный уровень миниатюризации микросхем позволяет существенно увеличить их количество.

2.2. *Анализ режимов работы «медленного точного» канала.* При работе АО ЛИП в режиме «медленных точных» измерений имеется возможность достижения максимальной разрешающей способностью $\Delta l_{лип}$, этому будет уделено максимальное внимание.

В общем случае использование системы ФАПЧ уменьшает полосу пропускания проходящего сигнала, формируемого фотоприемником, $\Delta f_{фп}$ до значения частоты среза ФНЧ $\Delta f_{фнч}$, равного доплеровскому набегу частот $\Delta f_{гон}$, зависящему от скорости движения объекта, позволяя записать в одном из двух вариантов, связанных со сложением частот:

$$\begin{aligned} \Delta f_{фп} &\approx f_{аом} + \Delta f_{фнч} = f_{аом} + k_{фпч} \cdot \Delta f_{гон} = \\ &= f_{аом} + k_{фпч} \cdot 2v_{об} / \lambda, \end{aligned} \quad (5)$$

где $k_{фпч}$ — частотный коэффициент системы ФАПЧ, $v_{об}$ — скорость контролируемого объекта.

Но так как расчет максимальной разрешающей способности АО ЛИП производится для режима «медленных точных» измерений, то для него можно считать, что $\Delta f_{гон} \rightarrow 0$, а $\Delta f_{фп} \rightarrow f_{аом}$. Это значит, что частоту среза ФНЧ $\Delta f_{фнч}$ можно сужать, ориентируясь, в первую очередь, на подавление шумов НЧ фотоприемника для достижения общей цели снижения разрешающей способности АО ЛИП до субпикометрических значений согласно уравнению (1).

В соответствии с конструктивным решением и алгоритмом работы вышеописанной разработанной двухканальной АО ЛИП проведем расчет разрешающей способности, используя справочные данные для современных фотоприемников.

Итак, суммарная фазовая погрешность АО ЛИП $\Delta \varphi_{\Sigma}$ ограничена тремя основными составляющими: джиттером — нестабильностью фронта сигнала ГУН $\Delta \varphi_{гж}$ погрешностью фазометра $\Delta \varphi_{фаз}$ и вносимыми шумами фотоприемника $\Delta \varphi_{фп}$. Принимая их независимый друг от друга характер и нормальный закон распределения для каждой, суммарную фазовую погрешность АО ЛИП $\Delta \varphi_{\Sigma}$ можно рассчитать по формуле их геометрического сложения:

$$\Delta \varphi_{\Sigma} = \sqrt{\Delta \varphi_{фп}^2 + \Delta \varphi_{гж}^2 + \Delta \varphi_{фаз}^2}. \quad (6)$$

Это позволяет записать выражение для разрешающей способности $\Delta l_{лип}$

$$\Delta l_{пер} = \frac{\lambda \Delta \varphi_{\Sigma}}{4\pi} = \frac{\lambda \sqrt{\Delta \varphi_{фп}^2 + \Delta \varphi_{гж}^2 + \Delta \varphi_{фаз}^2}}{4\pi}. \quad (7)$$

Для определения разрешающей способности ЛИП $\Delta l_{лип}$ и перспектив достижения ею субпикометрических значений далее рассмотрим более подробно каждую из этих вышеперечисленных фазовых погрешностей.

2.2.1. *Фазовая погрешность от джиттера ГУН системы ФАПЧ.* Расчет фазовой погрешности $\Delta \varphi_{гж}$ вызванной джиттером ГУН системы ФАПЧ, можно осуществить по формуле [19–20]:

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

К настоящему времени минимальное значение джиттера у лучших вариантов ГУН [21–22] может быть доведено до 0,1 10–12 с. Это значение взято за основу для дальнейших расчетов.

2.2.2. *Погрешность фазометра.* Для измерения разности фаз в малом диапазоне в составе АО ЛИП можно достаточно успешно применить прецизионный высокочастотный фазометр, который изначально был разработан для измерения нановибраций [23–25]. Его погрешность измерения фазы ограничивается, в основном, собственными шумами и составляет $\Delta \varphi_{фаз} = 6,28 \cdot 10^{-7}$ рад. И это значение учитывается при последующих расчетах.

3. *Фазовая погрешность, обусловленная шумами фотоприемника.* Ввиду важности и объемности рассмотрение этого вопроса вынесено отдельно.

Итак, еще относительно недавно, 10–30 лет назад, шуми фотоприемника были самым главным ограничением, определяющим разрешающую способность АО ЛИП [16, 26, 27]. Прогресс в построении схем АО ЛИП привел к пониманию, что уменьшить эту фазовую погрешность можно двумя путями:

1) подавлением шумов НЧ фотоприемника «медленного точного» канала за счет использования системы ФАПЧ;

2) выбором рабочей частоты АО ЛИП, значение которой является компромиссным между частотой АО модуляции $f_{аом}$ и частотой работы НЧ фотоприемника из частотного диапазона $[f_1; f_2]$ по выражению (1) согласно его нелинейной ШЧХ.

Возможности минимизации фазовой погрешности от уровня шумов НЧ фотоприемника рассмотрены далее.

3.1. *Анализ шумов НЧ фотоприемника «точного медленного» канала.* Фазовую погрешность, вызванную шумами фотоприемника $\Delta \varphi_{фп}$, с учетом соотношения сигнал/шум Q , можно рассчитать по формуле [18–20]:

$$\Delta \varphi_{фп} = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{Q}}. \quad (9)$$

Составляющие, влияющие на отношение сигнал/шум Q , рассматривались в работах [18–20, 26, 27]. В [27] было показано, что уравнение для отношения сигнал/шум можно записать в виде формулы:

$$Q = \frac{SP_0^2 \gamma_{св}^2 \gamma_{оп} \gamma_{изм}}{4\Delta f [qI_0 (\gamma_{оп} + \gamma_{изм}) + 2SP_{NEP}^2]}, \quad (10)$$

где $\gamma_{св}$ — коэффициент связи, учитывающий неполное согласование фронтов и степень перекрытия оптических пучков; $\gamma_{оп}$ 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 НЧ фотоприемника; P_{NEP} — эквивалентная оптическая мощность излучения, приходящаяся на единицу частоты полосы пропускания, размерность Вт/Гц^{1/2} (в дальнейшем — уровень шума); $\Delta f_{фп}$ — полоса пропускания фотоприемника; q — заряд электрона, $1,6 \cdot 10^{-19}$ К.

Левый множитель знаменателя выражения (10), содержащий коэффициенты $\gamma_{оп}$ и $\gamma_{изм}$, связан с дробовыми шумами от сигнальной засветки фотопри-

емника. Правый многочлен знаменателя в формуле (10), содержащий параметр P_{NEP}^2 , определяет такие шумовые составляющие, как дробовый шум от темнового тока, тепловой шум, шумы усилителя и фильтра и т.п.

Параметр P_{NEP} является справочным и, как правило, имеется почти для всех фотоприемников. Значения коэффициентов γ_{on} и $\gamma_{uzm'}$ учитывающие эффекты несогласованности размера чувствительной площадки фотоприемника и диаметра пучка, возможного виньетирования и дифракционной расходимости пучков, являются индивидуальными для каждой оптической схемы лазерного интерферометра. Их трудно оценить заранее и для расчетов удобнее ориентироваться на усредненные значения γ_{on} и $\gamma_{uzm'}$ приняв следующее условие:

$$qI_o(\gamma_{on} + \gamma_{uzm'}) = k_{onm} \cdot P_{NEP}^2. \quad (11)$$

Тогда из выражения (10) получим

$$Q = \frac{SP_0^2 \gamma_{cb}^2 \gamma_{on} \gamma_{uzm'}}{4\Delta f \cdot P_{NEP}^2 (k_{onm} + 2S)} = \frac{k_{юс}}{4\Delta f \cdot P_{NEP}^2}, \quad (12)$$

где $k_{юс} = \frac{SP_0^2 \gamma_{cb}^2 \gamma_{on} \gamma_{uzm'}}{k_{onm} + 2S}$ — коэффициент юстировки ЛИС.

Как видно, основными параметрами, влияющими на соотношение сигнал/шум Q , при хорошей юстировке являются полоса пропускания фотоприемника Δf_{fn} и его уровень шума P_{NEP} .

$$\Delta\phi_{fn} = \frac{2P_{NEP}}{\pi} \sqrt{\frac{\Delta f_{fn}}{k_{юс}}}. \quad (13)$$

3.2. Подавление шумов НЧ фотоприемника за счет использования системы ФАПЧ. Эффективность использования системы ФАПЧ по фильтрации шумов фотоприемника можно оценить по т.н. коэффициенту повышения разрешающей способности от уменьшения шумов $k_{yш}$ (в дальнейшем — коэффициент уменьшения шума). С учетом выражения (13) его можно определить как отношение фазовой погрешности от шумов фотоприемника до фильтрации (с учетом небольшого упрощения $\Delta f_{fn} \approx f_{aom'}$) к таковому после фильтрации $\Delta\phi_{fn'}$ связанного с доплеровским набегом частоты Δf_{gn} и, согласно выражению (5), с частотой среза ФНЧ $\Delta f_{fnч}$ системы ФАПЧ:

$$k_{yш} = \frac{\Delta\phi_{fn'}}{\Delta\phi_{fn}} \approx \sqrt{\frac{f_{aom'}}{\Delta f_{fnч}}}, \quad (14)$$

На основе этой формулы рассчитаны значения $k_{yш}$ и на рис. 3 представлено пять зависимостей коэффициента уменьшения шума $k_{yш}$ от частоты среза ФНЧ $\Delta f_{fnч}$ системы ФАПЧ (10 Гц, 100 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц, 1 МГц, 10 МГц в логарифмическом масштабе) для пяти значений частот АО модуляции f_{aom} : 10 МГц, 14 МГц, 25 МГц, 45 МГц, 60 МГц.

3.3. Анализ ШЧХ фотоприемников. В большинстве работ [18–20, 26, 27], рассчитывающих разрешающую способность АО ЛИП, для расчетов используется фиксированный постоянный уровень шумов. Однако уровень шумов нелинейно зависит от частоты входного оптического сигнала, поэтому для анализа разрешающей способности нужно использовать ШЧХ фотоприемников.

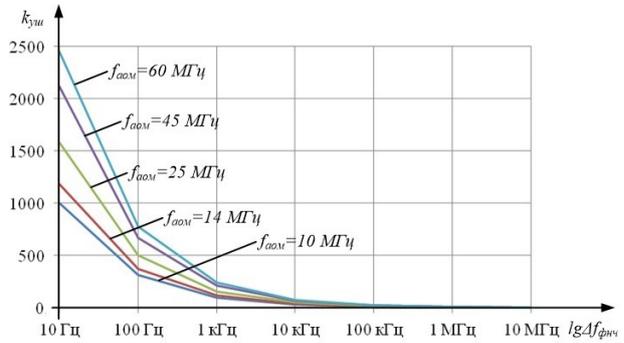


Рис. 3. Семейство зависимостей коэффициента уменьшения шумов $k_{yш}$ от частоты среза фильтра низких частот системы ФАПЧ $f_{fnч}$

В идеале полная ШЧХ фотоприемника должна быть в открытом доступе у каждого производителя. Однако на практике по разным причинам значения уровня шумов $P_{NEP}(f)$ часто даны только для нескольких точек для ограниченного частотного диапазона. И поэтому для полноценного метрологического анализа нужно по имеющимся данным восстановить, аппроксимировать реальную ШЧХ НЧ фотоприемника для нужного частотного диапазона с нужным шагом.

Для нахождения этих значений разработана методика, использованная далее. В ее основе лежит формирование ШЧХ, аппроксимирующей имеющиеся справочные данные для современных НЧ фотоприемников и экстраполирующей за их пределы, например, на диапазон частот вплоть до 80 МГц. С учетом этого далее рассмотрены вопросы определения ШЧХ для НЧ фотоприемников при использовании в АО ЛИП.

3.3.1. ШЧХ ВЧ фотоприемника. Одним из вариантов для использования в качестве ВЧ фотоприемника может быть фотодиодный модуль OE-300-SI-10 [28], работающий в частотном диапазоне до 200 МГц. Но для использования в составе АО ЛИП максимальной частотой можно считать 81 МГц, выбирая для удобства расчетов в данном и последующих случаях значение, кратное 3. Согласно справочным данным [28], для этого ВЧ фотоприемника известны четыре значения уровня шума $P_{NEP \text{ ВЧ}}(f)$ для частот 0, 3 МГц, 15 МГц и 81 МГц:

$$\begin{aligned} \text{точка А} &\sim P_{NEP \text{ ВЧ}}(0) = 0,0076 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}, \\ \text{точка В} &\sim P_{NEP \text{ ВЧ}}(3 \text{ МГц}) = 0,67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}, \\ \text{точка С} &\sim P_{NEP \text{ ВЧ}}(15 \text{ МГц}) = 2,2 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}, \\ \text{точка D} &\sim P_{NEP \text{ ВЧ}}(81 \text{ МГц}) = 10 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}. \end{aligned}$$

ШЧХ ВЧ фотоприемника для всего частотного диапазона можно упрощенно аппроксимировать прямой, соединяющей крайние точки А и D для двух значений частот 0 МГц и 81 МГц, с коэффициентами a_1 и b_1 :

$$P_{NEP \text{ ВЧ}}(f) = a_1 f + b_1. \quad (15)$$

Уравнение прямой, проходящей через две заданные точки $(x_1; y_1)$ и $(x_2; y_2)$, записывается в следующем виде:

$$ax + by + c =$$

$$= (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y + (x_1 y_2 - x_2 y_1) = 0, \quad (16)$$

где все исходные данные можно выразить системой уравнений:

$$\begin{cases} x_1 = f_1 = 0, \\ x_2 = f_2 = 81 \text{ МГц}, \\ y_1 = P_{NEP \text{ вч}}(0) = 0,67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}, \\ y_2 = P_{NEP \text{ вч}}(81 \text{ МГц}) = 10 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}. \end{cases} \quad (17)$$

С учетом этого уравнение прямой, проходящей через точки А и D с вышеуказанными соответствующими значениями частоты сигнала и уровнями шума, примет вид:

$$-9,924f + 81P_{NEP \text{ вч}}(f) - 6,156 = 0. \quad (18)$$

При расчете из него получаем значения искомым коэффициентов $a_1 \approx 0,1225$ и $b_1 \approx 0,076$, на основе которых можно записать уравнение для прямой ШЧХ ВЧ фотоприемника:

$$P_{NEP \text{ вч}}(f) = 0,1225f + 0,076, \quad (19)$$

график которой изображен на рис. 4.

Для проверки правильности определим значения аппроксимированной функции $P'_{NEP \text{ вч}}(f)$ для частот 3 и 15 МГц для точек В' и С' (как и ранее, выбирая значения частот, кратное 3):

$$\begin{aligned} \text{точка В}' &\sim P'_{NEP \text{ вч}}(3 \text{ МГц}) = 0,4435 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}, \\ \text{точка С}' &\sim P'_{NEP \text{ вч}}(15 \text{ МГц}) = 1,91 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}. \end{aligned}$$

Как видно, эти значения достаточно близки реальным вышеприведенным справочным данным, подтверждая корректность определения ШЧХ ВЧ фотоприемника. И в своей основе подобное может быть использовано также и для определения ШЧХ НЧ фотоприемника, которое будет рассмотрено далее.

3.3.2. ШЧХ НЧ фотоприемника. В качестве НЧ фотоприемника будем рассматривать фотодиодный модуль А-CUBE-5500-25 [29], для которого справочные данные по $P_{NEP \text{ нч}}(f)$ даны для частот только до 24 МГц. Для этих значений можно создать две ШЧХ: $P'_{NEP \text{ нч}}(f)$ и $P''_{NEP \text{ нч}}(f)$, создающих соответственно т.н. «пессимистическую» (верхнюю) и «оптимистическую» (нижнюю) границы уровня шумов фотоприемников.

Итак, значения трех точек Е, F и D одинаковы для обоих ШЧХ (как и ранее, выбирая значение частот, кратное 3):

$$\begin{aligned} \text{точка Е} &\sim P'_{NEP \text{ нч}}(0) = P''_{NEP \text{ нч}}(0) = 0,0075 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}, \\ \text{точка F} &\sim P'_{NEP \text{ нч}}(24 \text{ МГц}) = P''_{NEP \text{ нч}}(24 \text{ МГц}) = 0,1 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}, \\ \text{точка D} &\sim P'_{NEP \text{ нч}}(81 \text{ МГц}) = P''_{NEP \text{ нч}}(81 \text{ МГц}) = 10 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}. \end{aligned}$$

Согласно общему выражению для определения формулы прямой по двум точкам, подобно уравнению (15), получаем ШЧХ НЧ фотоприемника с известными справочными данными для участка [Е; F]:

$$-0,0925f + 24P'_{NEP \text{ нч}}(f) - 0,18 = 0. \quad (20)$$

Из него получаем значения искомым коэффициентов $a_2 \approx 0,00385$ и $b_2 \approx 0,0075$, с учетом которых можно записать уравнение прямой для участка [Е; F]:

$$P'_{NEP \text{ нч}}(f) = P''_{NEP \text{ нч}}(f) = 0,00385f + 0,0075. \quad (21)$$

Это уравнение описывает известные справочные данные для фотодиодного модуля А-CUBE-5500-25 для частотного диапазона от 0 до 24 МГц. Построение ШЧХ НЧ фотоприемника для частотного диапа-

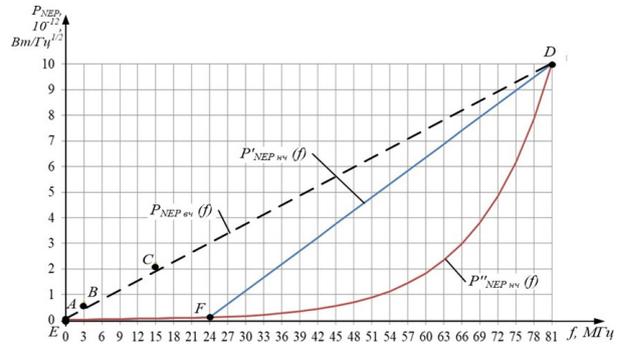


Рис. 4. ШЧХ фотоприемников

зона от 24 МГц до 81 МГц возможно при экстраполяции, принимая два варианта: «пессимистический» и «оптимистический». Для «пессимистического» варианта примем линейную зависимость уровня шумов от частоты с прямой, соединяющей точки F и D. Для «оптимистического» варианта примем нелинейную зависимость уровня шумов от частоты с кривой, описываемой показательной функцией, соединяющей точки F и D. Определение параметров этих прямой и нелинейной кривой, соединяющих точки F и D, для «пессимистического» и «оптимистического» вариантов ШЧХ НЧ фотоприемника на участке [F; D] рассмотрено далее. Результаты расчетов ШЧХ фотоприемников приведены в табл. 1.

3.3.2.1. «Пессимистическая» ШЧХ НЧ фотоприемника. По аналогии с вышеприведенными расчетами уравнение прямой для «пессимистического» варианта ШЧХ НЧ фотоприемника, соединяющей точки F и D с вышеуказанными уровнями шумов для частотного диапазона от 24 МГц до 81 МГц, примет вид:

$$-9,9f + 57 + 231,9 = 0. \quad (22)$$

Из него определяются значения искомым коэффициентов $a_3 \approx 0,174$ и $b_3 \approx -4,068$, с использованием которых можно записать искомое уравнение:

$$P'_{NEP \text{ нч}}(f) = 0,174f - 4,068. \quad (23)$$

Таким образом, кусочно-линейная функция «пессимистической» ШЧХ для НЧ фотоприемника примет вид (рис. 4):

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

где $P'_{NEP \text{ нч}}(f)$ выражена в $10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$, f — частота оптического сигнала на входе фотоприемника в МГц.

3.3.2.2. «Оптимистическая» ШЧХ НЧ фотоприемника. Определим параметры «оптимистической» ШЧХ НЧ фотоприемника $P''_{NEP \text{ нч}}(f)$ для частотного диапазона от 24 МГц до 81 МГц. Как показано выше, на первом участке [Е; F] функции для первой и второй ШЧХ равны $P'_{NEP \text{ нч}}(f) = P''_{NEP \text{ нч}}(f)$, соответствуя выражению (21).

Для определения параметров «оптимистической» ШЧХ НЧ фотоприемника $P''_{NEP \text{ нч}}(f)$ на втором участке [F; D] предлагается использовать показательную функцию с коэффициентами a_4 и b_4 :

$$P''_{NEP \text{ нч}}(f) = 10^{a_4 f + b_4} \quad (25)$$

или записанной через десятичный логарифм:

$$\lg[P''_{NEP\text{ нч}}(f)] = a_4 f + b_4. \quad (26)$$

Тогда уравнение прямой, проходящей через две точки F и D в частотном диапазоне от 24 МГц до 81 МГц с вышеуказанными уровнями шумов, можно записать в виде:

$$-2f + 57\lg[P''_{NEP\text{ нч}}(f)] + 105 = 0. \quad (27)$$

После расчета можем получить значения искомым коэффициентов $a_4 \approx 0,0351$ и $b_4 \approx -1,842$ и записать уравнение «оптимистической» ШЧХ для отрезка [F; D]:

$$P''_{NEP\text{ нч}}(f) = 10^{0,0351f - 1,842}. \quad (28)$$

С учетом этого функцию «оптимистической» ШЧХ можно представить в полном виде (рис. 4):

$$P''_{NEP\text{ нч}}(f) = \begin{cases} 0,00385f + 0,0075, & f \leq 24 \text{ МГц}, \\ 10^{0,0351f - 1,842}, & f > 24 \text{ МГц}. \end{cases} \quad (29)$$

4. Разрешающая способность АО ЛИП. На основе ранее определенных составляющих суммарной фазовой погрешности $\Delta\varphi_{\Sigma}$, основанных в т.ч. на «пессимистической» или «оптимистической» ШЧХ НЧ фотоприемника, получены результаты расчетов разрешающей способности АО ЛИП $\Delta l_{\text{лип}}$, представленные в табл. 1 и изображенные на рис. 5 и 6 соответственно. При расчетах использовались результаты расчетов, взятые из [27], согласно которым при $\Delta f_{\text{фн}} = 4 \cdot 10^7$ Гц, $P_{NEP} = 30 \cdot 10^{-12}$ Вт·Гц $^{-1/2}$ при использовании уравнения (12) определено расчетным путем значение $Q \approx 1000$. На рис. 5 и 6 выделена горизонтальная прямая, соответствующая значению 1 пм.

Как следует из них, при использовании «пессимистической» ШЧХ НЧ фотоприемника условие $\Delta l_{\text{лип}} \leq 1$ пм выполняется вплоть до следующих сочетаний: рабочая частота 27 МГц и доплеровский набег частоты $\Delta f_{\text{гон}} \leq 10$ кГц ($v_{\text{гб}} \approx 3$ мм/с) или соответственно 30 МГц и $\Delta f_{\text{гон}} \leq 1$ кГц ($v_{\text{гб}} \approx 0,3$ мм/с).

При использовании «оптимистической» ШЧХ НЧ фотоприемника условие $\Delta l_{\text{лип}} \leq 1$ пм выполняется при сочетании рабочей частоты 30 МГц и $\Delta f_{\text{гон}} \leq 10$ кГц ($v_{\text{гб}} \approx 3$ мм/с).

Таким образом, достижение разрешающей способности АО ЛИП субмикрометрических значений $\Delta l_{\text{лип}} \leq 1$ пм (выделенная горизонтальная прямая) для предложенной схемы и современных НЧ фотоприемников возможно при рабочих частотах менее 27–30 МГц.

Диаграммы, изображенные на рис. 7, для четырех значений рабочих частот $f_{\text{оом}}$ 15 МГц, 30 МГц, 45 МГц и 60 МГц показывают соотношение трех составляющих фазовой погрешности: джиттера $\Delta\varphi_{\text{дж}}$, погрешности фазометра $\Delta\varphi_{\text{фаз}}$ и погрешности от шумов фотоприемника $\Delta\varphi_{\text{фн}}$ при «оптимистической» ШЧХ и $f_{\text{фнч}} = 10$ кГц. Как видно, фазовая погрешность от джиттера $\Delta\varphi_{\text{дж}}$ преобладает на всех рабочих частотах. Это означает, что при обеспечении субмикрометрической разрешающей способности АО ЛИП снижение жестких требований к фильтрации шумов фотоприемника, существенно ограничивающих скорость движения контролируемого объекта, может быть реализовано только за счет дальнейшего снижения джиттера ГУН си-

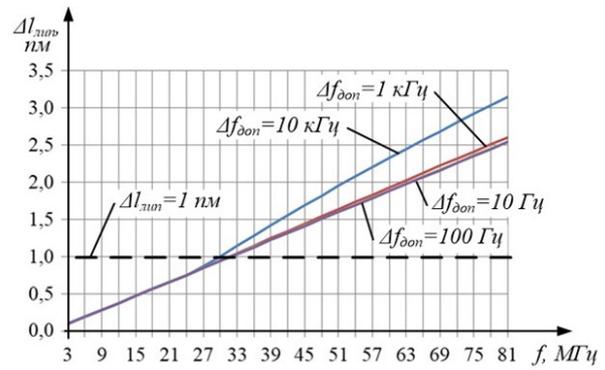


Рис. 5. График зависимости разрешающей способности ЛИП $\Delta l_{\text{лип}}$ от частоты сигнала f для «пессимистической» ШЧХ НЧ фотоприемника

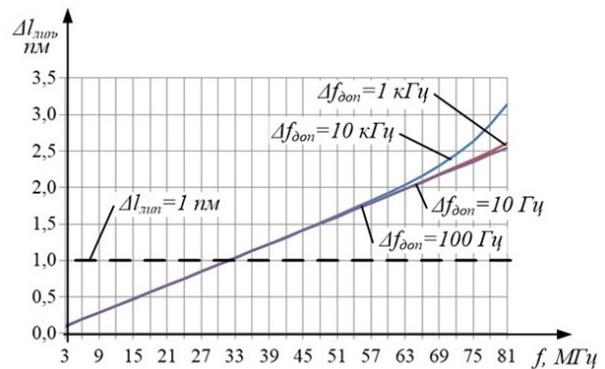


Рис. 6. График зависимости разрешающей способности ЛИП $\Delta l_{\text{лип}}$ от частоты сигнала f для «оптимистической» ШЧХ НЧ фотоприемника

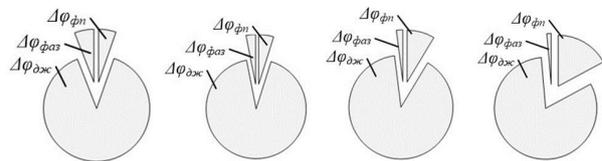


Рис. 7. Диаграммы, демонстрирующие соотношение фазовых погрешностей АО ЛИП: от шумов фотоприемника $\Delta\varphi_{\text{фн}}$, джиттера $\Delta\varphi_{\text{дж}}$ и фазометра $\Delta\varphi_{\text{фаз}}$ для разных частот сигнала: 15 МГц (а), 30 МГц (б), 45 МГц (в) и 60 МГц (г)

стемы ФАПЧ и/или значения рабочей частоты АО ЛИП. Более подробно это будет рассмотрено в следующих авторских публикациях.

Заключение

1. Использование двух независимых ВЧ и НЧ фотоприемников для работы с «быстрым грубым» и «медленным точным» каналами позволяет сформировать два диапазона скоростей перемещения изделия. Использование НЧ фотоприемника с «медленным точным» каналом в диапазоне малых скоростей позволяет достичь максимальной разрешающей способности.

2. Расчет разрешающей способности АО ЛИП возможен при наличии ШЧХ НЧ фотоприемника в частотном диапазоне до 30–50 МГц. Ограничения частотного диапазона справочных данных ШЧХ НЧ фотоприемника обуславливают искусственно расширять ШЧХ НЧ фотоприемника за счет экс-

траполяции. При этом возможны формирование т.н. «пессимистической» (верхней) и «оптимистической» (нижней) границы значений ШЧХ НЧ фотоприемника.

3. Использование современных НЧ фотоприемников позволяет достичь субмикрометрической разрешающей способности при следующих сочетаниях АО ЛИП: рабочая частота 27 МГц и доплеровский набег частоты $\Delta f_{\text{гон}} \leq 10$ кГц ($v_{\text{гв}} \approx 3$ мм/с) или соответственно 30 МГц и $\Delta f_{\text{гон}} \leq 1$ кГц ($v_{\text{гв}} \approx 0,3$ мм/с).

4. Фазовая погрешность от джиттера $\Delta\varphi_{\text{гж}}$ является превалирующей среди всех составляющих суммарной фазовой погрешности на всех частотах. И при обеспечении субмикрометрической разрешающей способности АО ЛИП снижение жестких требований к фильтрации шумов фотоприемника, существенно ограничивающих скорость движения контролируемого объекта, может быть реализовано только за счет дальнейшего снижения джиттера ГУН системы ФАПЧ и/или значения рабочей частоты АО ЛИП.

Благодарности

Автор благодарит к.т.н., 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. Watchi J., Cooper S., Ding B. [et al.]. Contributed Review: A review of compact interferometers // *Review of Scientific Instruments*. 2018. Vol. 89. 121501. DOI: 10.1063/1.5052042/
2. Hou W., Zhang Y., Le Y. [et al.]. Elimination of the nonlinearity of heterodyne displacement interferometers // *Chinese Journal of Lasers*. 2012. Vol. 39 (9). DOI: 10.3788/CJL201239.0908006.
3. Vitushkin L., Orlov O., Germak A. [et al.]. Laser displacement interferometers with subnanometre resolution in absolute ballistic gravimeters // *Measurement Techniques*. 2012. Vol. 55 (3). P. 221–228. DOI: 10.1007/sl 1018- 012-9944-8.
4. Arablou M., Smith S. T. Polydyne displacement interferometer using frequency-modulated light // *Review of Scientific Instruments*. 2018. Vol. 89. 055007. DOI: 10.1063/1.5026569.
5. Cooper S., Collins C., Green A. [et al.]. A compact, large-range interferometer for precision measurement and inertial sensing // *Classical and Quantum Gravity* 2017. Vol. 35 (9). 095007. DOI: 10.1088/1361-6382/aab2e9.
6. Lawall J., Kessler E. Michelson interferometry with 10 pm accuracy // *Rev. Sci. Instrum.* 2000. Vol. 71. P. 2669–2676. DOI: 10.1063/1.1150715.
7. 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.
8. Libbrecht 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.
9. Isleifk.-S, Heinzl G., Mehmet M., Gerberding O. Compact multifringe interferometry with subpicometer precision // *Physical Review Applied*. 2019. Vol. 12 (3). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.12.034025.
10. Hao Y., Hui-Zong D., Lin-Tao L. [et al.]. A dual-heterodyne laser interferometer for simultaneous measurement of linear and angular displacements // *Review of Scientific Instruments*. 2015. Vol. 86. 123102. DOI: 10.1063/1.4936771.
11. Пат. 2504731 Российская Федерация, МПК G 01 B 9/02, G 01 S 5/02, G 01 S 3/46. Акустооптический интерферометр /

Ерачев С. В., Наумов К. П., Ушаков В. Н.; заявл. 17.07.12; опубл. 20.01.14, Бюл. № 2.

12. 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 // *Conference: Optical Micro- and Nanometrology*. 2018. DOI: 10.1117/12.2307316.
13. Duhring M. B., Sigmund O. Improving the acousto-optical interaction in a Mach-Zehnder interferometer // *Journal of Applied Physics*. 2009. Vol. 105 (8). 083529–083529-9. DOI: 10.1063/1.3114552.
14. Tekavec P. F., Dyke T. R., Marcus A. H. Wave packet interferometry and quantum state reconstruction by acousto-optic phase modulation // *The Journal of Chemical Physics*. 2006. Vol. 125 (19). 194303. DOI: 10.1063/1.2386159.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Генераторы кварцевые ГК-152-УН-А. ЗАО НПФ «БМГ ПЛЮС». URL: <http://www.bmgplus.ru/images/pdf/pdf152a.pdf> (дата обращения: 02.03.2021).
21. 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: 15.03.2021).
22. Гончаренко А. М., Бугров С. В., Воевода А. А. [и др.]. Метрологические испытания цифрового прецизионного фазометра // *Сборник научных трудов Новосибирского гос. техн. ун-та*. 2009. № 2 (56). С. 109–114.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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 (дата обращения: 15.03.2021).

29. 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 (дата обращения: 15.03.2021).

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», г. Химки.
SPIN-код: 6060-8056
AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184
Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

Для цитирования

Леун Е. В. К вопросу достижения субмикрометрической разрешающей способности акустооптическим двухканальным лазерным интерферометром перемещений с двумя разночастотными фотоприемниками // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 110–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-110-118.

Статья поступила в редакцию 25.02.2022 г.

© Е. В. Леун