

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ЧАСТОТНО-ФАЗОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ВЛИЯНИЕМ ШУМОВ ГЕТЕРОДИННОГО ФОТОПРИЕМНИКА

Е.А. Зайцев, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина
e-mail: zaitsev@i.ua

Рассмотрена структурная схема частотно-фазовой системы, предназначенной для определения расстояний и линейных перемещений. Особенностью системы является использование оптического канала для формирования гетеродинного сигнала. Показано, что в рассматриваемой системе имеет место погрешность, определяемая отношением сигнал/шум на выходе фотоприемника гетеродина. Определены значения этой погрешности при разном отношении сигнал/шум. Библ. 10, рис. 4.

Ключевые слова: лазер, частотная модуляция, расстояние, гетеродин, погрешность.

Лазерные измерители расстояний и линейных перемещений находят все более широкое применение при решении различных задач, в которых возникает необходимость в измерении расстояний и линейных перемещений с точностью до долей сантиметра. К таким задачам можно отнести мониторинг параметров железнодорожного пути [5], специальных инженерных объектов [1, 9] элементов авиа- и ракетотехники и многое другое. Причем во многих измерительных задачах ограничено время доступа к объекту. Для решения этих и подобных задач перспективным является применение частотно-фазовых (ЧФ) бесконтактных информационно-измерительных систем (ИИС). Отличительной особенностью предлагаемой ЧФ ИИС по сравнению с ранее разработанной системой [6] является использование оптического канала взамен электрического для формирования гетеродинного сигнала. Такая структура позволяет минимизировать погрешность из-за дрейфа полупроводникового лазерного источника и фотоприемника. Но, с другой стороны, при таком построении возникают шумы, связанные с применением дополнительного гетеродинного фотоприемника. Последние вызывают появление дополнительной погрешности в ЧФ ИИС, зависящей от соотношения сигнал/шум (с/ш) на выходе фотоприемника оптического канала.

Целью данной работы являются расчетные исследования погрешности ЧФ ИИС, обусловленной с/ш на выходе фотоприемника гетеродина в зависимости от значения отклонения светового потока лазера полупрозрачным зеркалом. Для достижения поставленной цели рассмотрим алгоритм работы и обобщенную структурную схему лазерной ЧФ ИИС (рис. 1). На схеме приняты следующие условные обозначения: ПЛИ – полупроводниковый лазерный излучатель; УСЧ – управляемый синтезатор частоты; ФП₁ и ФП₂ – фотоприемники; ПЗ₁ и ПЗ₂ – полупрозрачные зеркала; ФРЦ – фазорасщепляющая цепочка; СМ₁ и СМ₂ – смесители;

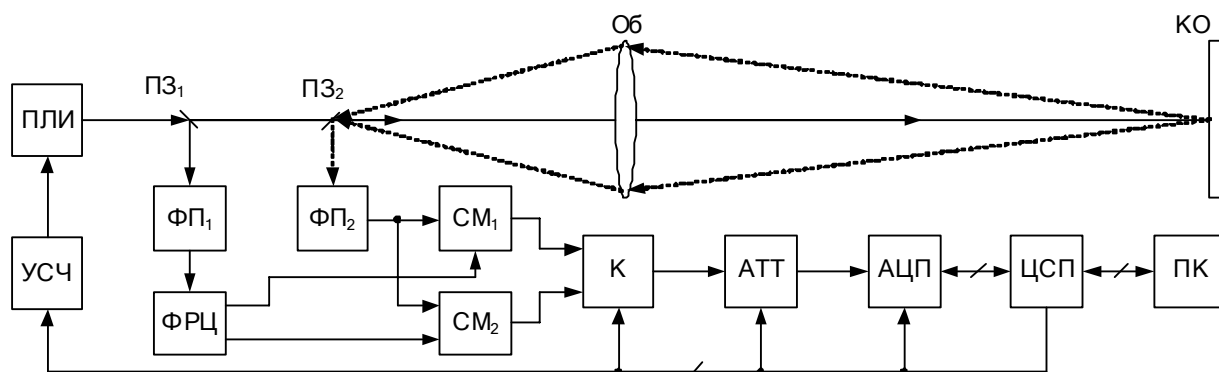


Рис. 1

К – коммутатор; АТТ – аттенюатор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь напряжения; ЦСП – цифровой сигнальный процессор; ПК – персональный компьютер; Об – объектив; КО – контролируемый диффузно-отражающий объект.

Принцип работы ЧФ ИИС следующий: модулированное лазерное излучение ПЛИ через полупрозрачные зеркала ПЗ₁ частично направляется на ФП₁, а также через ПЗ₂ и объектив Об – на контролируемый объект КО. Отразившись от КО, световое излучение через Об направляется с помощью ПЗ₂ на фотоприемник ФП₂. Частота модуляции f_M ПЛИ определяется выходным напряжением УСЧ, который управляется цифровым сигнальным процессором ЦСП. Изменение частоты f_M имеет циклически возрастающий ступенчатый характер. При заданном алгоритме изменения частоты f_M зондирующего сигнала, значения фазовых сдвигов сигналов, отраженных от каждого объекта, так же изменяются по заданному алгоритму. В результате на j -й частоте f_M получаем гармонический сигнал со значением фазового сдвига:

$$\varphi_k(j) = 2\pi L / \lambda_3(j) = 4\pi L \cdot (f_0 + j \cdot \Delta f) / c, \quad (1)$$

где L – измеряемое расстояние; $\lambda_3(j) = c / 2f_M = c / 2(f_0 + j \cdot \Delta f)$ – длина волны модулирующего напряжения f_M ; c – скорость света, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; f_0 – начальное значение частоты модуляции, $f_0 = 22$ МГц; Δf – шаг перестройки частоты f_M ; j – номер шага перестройки частоты f_M , целое число, $j = 1 \dots m$. В свою очередь $m = T_0 / t'$ – целое число, где T_0 – временной интервал, соответствующий длительности цикла изменения $f_M(j)$; t' – временной интервал, определяющий в ЧФ системах время ступени заданной частоты модуляции [2].

Напряжение $U_{\text{ФП2}}$, соответствующее измеряемому сигналу, поступает на один из входов каждого из смесителей СМ₁ и СМ₂. На вторые входы этих смесителей подается напряжение с выхода ФП₁, используемое в качестве опорного (гетеродинного) сигнала, причем на входы смесителей СМ₁ и СМ₂ напряжение подается через фазорасщепляющую цепочку ФРЦ, обеспечивающую сдвиг фазы сигналов на $\pm\varphi_{\text{СДВ}} = \pm 45^\circ$. При этом выходные напряжения $U_{\text{СМ1}}(t')$ и $U_{\text{СМ2}}(t')$ соответственно смесителей СМ₁ и СМ₂ определяются следующими выражениями:

$$U_{\text{СМ1}}(t') = k_1(t') \cdot (U_{\text{ФП1}} \sin(2\pi f_M t' + \varphi_{\text{СДВ}}) + U_{\text{Ш}}) \cdot U_{\text{ФП2}} \sin(2\pi f_M t' + \varphi_k), \quad (2)$$

$$U_{\text{СМ2}}(t') = k_2(t') \cdot (U_{\text{ФП1}} \sin(2\pi f_M t' - \varphi_{\text{СДВ}}) + U_{\text{Ш}}) \cdot U_{\text{ФП2}} \sin(2\pi f_M t' + \varphi_k), \quad (3)$$

где $k_1(t')$ и $k_2(t')$ – функции преобразования смесителей СМ₁ и СМ₂, соответственно имеющие размерность 1/В, причем $k_1(t') \approx k_2(t') = k(t')$; $U_{\text{Ш}} = U'_{\text{Ш}} \cdot \xi(t')$ – шумы на выходе гетеродинного фотоприемника ФП₁, где $U'_{\text{Ш}}$ – амплитудное значение шума; $\xi(t')$ – функция, соответствующая виду действующих шумов на выходе ФП₁.

Низкочастотные составляющие $U'_{\text{СМ1}}(t')$ и $U'_{\text{СМ2}}(t')$ соответственно напряжений $U_{\text{СМ1}}$ и $U_{\text{СМ2}}$ выделяются фильтрами нижних частот, расположенных на выходах СМ₁ и СМ₂. Далее, значения $U'_{\text{СМ1}}(t')$ и $U'_{\text{СМ2}}(t')$, представляющие собой квадратурные составляющие исследуемого измерительного сигнала, через аттенюатор АТТ поступают на вход АЦП, выходной код которого пересылается в ЦСП. Цифровые данные, переданные в ЦСП, используются для вычисления фазового сдвига φ_k на основе метода преобразования Гильберта, который в общем виде определяется как

$$\varphi_k(i\Delta t_d) = \arctg \left(\frac{\sum_{i=1}^n U'_{\text{СМ1}}(i\Delta t_d)}{\sum_{i=1}^n U'_{\text{СМ2}}(i\Delta t_d)} \right) + \Delta\varphi_{\text{ПФ1}}(i\Delta t_d), \quad (4)$$

где $\Delta\varphi_{\text{ПФ1}}$ – погрешность φ_k , вызванная шумами ξ ; Δt_d – временной интервал дискретизации исследуемых электрических сигналов; i – целое число, $i = 1 \dots n$, где $n = t' / \Delta t_d$ – целое число.

Далее, значение φ_k из ЦСП пересылается в ПК. Сформированный в результате пересылки пакет данных (фрейм) используется вычислительными программами для проведения цифрового анализа на основе использования БПФ [2,6], в результате которого находится измеряемое расстояние.

В рассматриваемых ЧФ устройствах погрешность $\Delta\varphi_{\text{ПФ1}}$ вызвана действием шумов ξ , состоящих в основном из суммы шумов двух видов: шума регистрируемого сигнала и шума самого фотоприемника ФП1.

Шум ξ_C , вносимый сигналом, вызывается главным образом статистическими флуктуациями лазерного потока при регистрации фотонов ФП1. Собственный шум фотоприемника представляет собой хаотический сигнал со случайной амплитудой и частотой, присутствующий на его выходе наряду с полезным сигналом. Шумы, возникающие в фотоприемнике ФП1, являются суммой всех его шумов. Основным фактором, влияющим на шум фотоприемника, является темновой ток I_T . При фототоке I_ϕ , меньшем тока I_T , полезный ток сигнала I_C неразличим на фоне шумов, вызванных темновым током. Однако влияние темнового тока в ЧФ системах исключено за счет амплитудной модуляции лазерного потока ПЛИ с последующим усилением соответствующего переменного фототока, снимаемого с выхода нагрузочного резистора ФП1. Также в ФП1 есть внутренние шумы, которые связаны с корпускулярной природой света и электричества. Основные виды шумов характерные для фотоприемников: тепловой ξ_T , дробовой ξ_D , избыточный $\xi_{\text{и}}$, фоновый $\xi_{\text{Ф1}}$ и фотонный $\xi_{\text{Ф2}}$ [7]. Для лавинного фотодиода ФД311Л, который используется в качестве ФП1 в ЧФ ИИС, с/ш на его выходе зависит от уровней дробового ξ_D и теплового ξ_T шумов нагрузки ФП1 [4].

Тепловой шум ФП1 обусловлен хаотическим тепловым движением свободных электронов в веществе фотодетектора. В результате такого движения концентрация электронов, а следовательно, и плотность электрического заряда в различных токах объема испытывают хаотические флуктуации. Этот вид шума не зависит от полезного сигнала и характеризуется равномерным спектром в полосе частот пропускания фотоприемника ФП1. Тепловой шум относится к так называемым белым шумам. Напряжение тепловых шумов на нагрузке фотоприемника R_H определяется исходя из формулы Найквиста [7, 3]:

$$U_T = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f \cdot R_H}, \quad (5)$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – температура фотоприемника ФП1, $T = 296$ К; R_H – сопротивление нагрузки, $R_H = 5$ кОм; Δf – полоса частот пропускания ФП1, в которой регистрируется шум, $\Delta f = 100$ МГц. После подстановки численных значений в формулу (5) получим $U_T = 11 \cdot 10^{-3}$ В. Основным методом (способом уменьшения теплового шума) является охлаждение ФП1 (например, применение охлаждающего радиатора).

Дробовой шум ФП1 обусловлен тем, что электрический ток в ФП1 представляет собой поток дискретных заряженных частиц – электронов. Число электронов, проходящих в единицу времени через выделенное поперечное сечение, флуктуирует относительно своего среднего уровня [7]. Использование лавинного умножения в фотодиоде ФД311Л позволяет значительно увеличить чувствительность ФП1, т.е. уровень сигнального тока на выходе ФП1. Однако увеличение в M раз сигнального тока вызывает увеличение шума в $MF^{1/2}$ раз, где F – шум-фактор [4]. Такое увеличение шума связано со случайным характером ионизационных столкновений при лавинном умножении. Протекая по сопротивлению R_H , флуктуационная составляющая тока создает шумовое напряжение, среднееквадратическое значение которого определяется формулой Шоттки [4, 3]:

$$U_{\text{д}} = R_{\text{н}} \sqrt{2e \cdot i_0 \cdot M^2 \cdot F \cdot \Delta f}, \quad (6)$$

где e – заряд электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; i_0 – начальный ток фотоприемника, определяемый суммой темнового тока и фототока (определен экспериментально исходя из минимального значения амплитудно-фазовой погрешности ФП₁), $i_0 = 5$ мкА; M – средний коэффициент умножения в инициированной электронной лавине, $M = 10$ для фотоприемника ФД311Л; F – шум-фактор или коэффициент шума лавинного умножения, с учетом формулы Макин-тайра $F = M^x$ [4], где x – показатель избыточного шума лавинного умножения, который зависит от материала и типа носителя, вызывающих лавину, а также от значения питания фотоприемника, $x = 0,6$ для фотоприемника ФД311Л.

После подстановки численных значений в формулу (6) получим $U_{\text{д}} = 35 \cdot 10^{-9}$ В.

Результирующее действие напряжений шумов ФП₁ при учете их некоррелированности равно

$$U_{\text{ш}} = (U_{\text{д}}^2 + U_{\text{т}}^2)^{1/2} \approx 0,11 \cdot 10^{-3} \text{ В}. \quad (7)$$

Для оценки с/ш на выходе ФП₁ определим мощность светового излучения лазера, которое через полупрозрачное зеркало ПЗ₁ попадает на фотоприемник [4, 7]:

$$\Phi_{\text{сигн}} \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{D^2}{L^2} \cdot \alpha \cdot P_{\text{ли}} \cdot \chi, \quad (8)$$

где L – расстояние от ПЛИ до ФП₁, пройденное лазерным излучением через ПЗ₁, $L = 5$ см; D – диаметр объектива ФП₁, $D = 0,8$ см; $P_{\text{ли}}$ – мощность ПЛИ, $P_{\text{ли}} = 20$ мВт для полупроводникового лазерного диода ML101J23 (производитель Mitsubishi); χ – коэффициент отражения светового излучения от объектива и ПЗ₁, $\chi = 0,2$; α – коэффициент, учитывающий значение ответвления светового потока лазера полупрозрачным зеркалом ПЗ₁, как показано в [2], может изменяться в диапазоне от 0,03...0,5.

Значение тока фотоприемника ФП₁, возникающего под действием оптической мощности исследуемого сигнала $\Phi_{\text{сигн}}$ [7], создает напряжение, которое равно

$$U_{\text{с}} = S \cdot M \cdot \Phi_{\text{сигн}} \cdot R_{\text{н}}, \quad (9)$$

где S – чувствительность фотоприемника ФП₁, $S = 0,5$ А/Вт для фотоприемника ФД311Л.

С учетом формул (8) и (9) после подстановки численных значений получим $U_{\text{с}} = \alpha \cdot 0,53$ В.

Отношение с/ш на выходе фотоприемника ФП₁ имеет вид

$$\rho = U_{\text{с}} / U_{\text{ш}} \approx \alpha \cdot 1840. \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что значение ρ на выходе ФП₁ пропорционально коэффициенту ответвления светового потока α полупрозрачным зеркалом ПЗ₁ на ФП₁. Максимальное значение с/ш принимает при значении $\alpha = 0,3$, и составляет 920. При этом погрешности $\Delta\varphi_{\text{ПФ1}}$ зависят от с/ш косвенным путем, как следует из формул (2)...(4).

Оценка зависимости погрешности $\Delta\varphi_{\text{ПФ1}}$ от с/ш в диапазоне изменения частоты модулирующего напряжения 22,5...90 МГц с учетом формул (2)...(4), (10) и [8] производилась путем электронного моделирования для полосы пропускания ФП₁ ($\Delta f_{\text{П}} = 100$ МГц). Электронное моделирование ЧФ ИИС выполнено в среде визуального программирования NI LabView [10] с помощью специальных модулей, входящих в ее состав, а также простейших арифметических операций. Графико-модульная схема (мнемограмма) разработанной модели аппаратной части ЧФ ИИС, выполненной в среде используемой программы, представлена на рис. 2, на котором обозначено: 1 – блок задания начальных параметров для системы моделирования; 2 – генератор действующих шумов на выходе ФП₁, с учетом результатов вычислений по формулам (5) и (6) выбрана модель белого шума; 3 – генератор синусоидального сигнала, соответст-

вующего измеряемому сигналу; 4, 5 – генераторы синусоидального сигнала, соответствующие значению опорного сигнала на выходе ФРЦ; 6 – блок определения частоты дискретизации; 7, 8 – сумматоры; 9, 10 – смесители; 11, 12 – интеграторы; 13, 14 – фильтры нижних частот Баттерворта второго порядка; 15, 16 – преобразователь динамического типа данных в массив; 17, 18 – блок определения значений $U'_{CM1}(t')$ и $U'_{CM2}(t')$; 19 – блок вычисления фазового сдвига $\varphi_k(i\Delta t_d)$ по формуле (4); 20 – блок учета квадранта в зависимости от значений $U'_{CM1}(t')$ и $U'_{CM2}(t')$; 21 – вычитатель; 22 – блок индикации результатов вычисления.

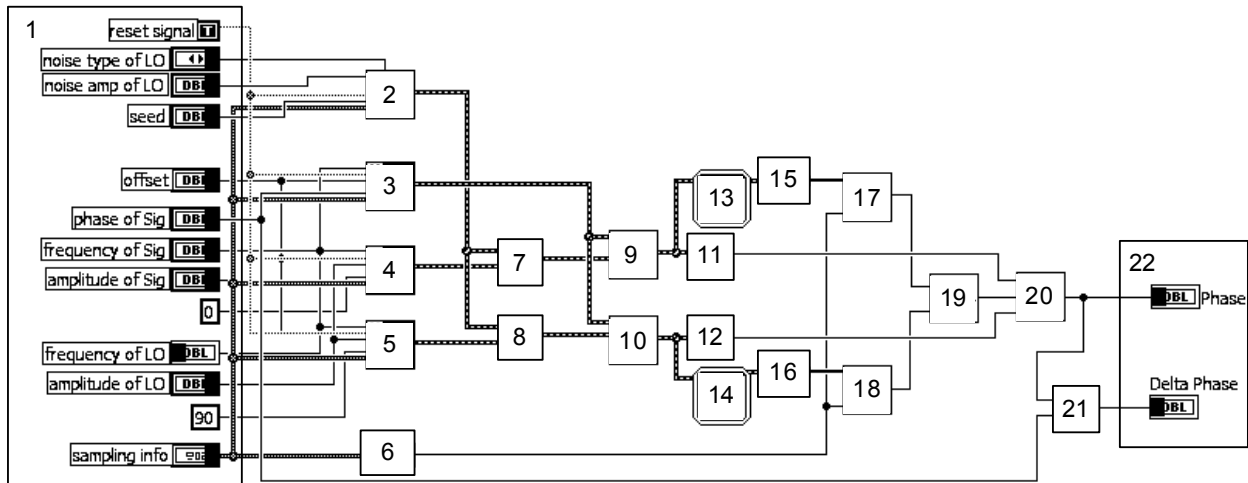


Рис. 2

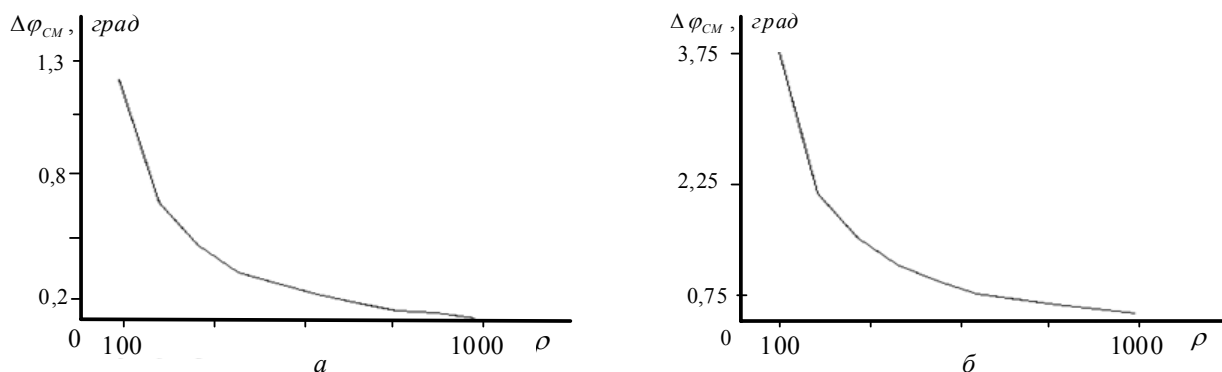


Рис. 3

Результаты проведенных исследований представлены в виде графиков на рис. 3 и 4. На рис. 3 показана зависимость погрешности $\Delta\varphi_{\text{ПФ1}}$ от значения с/ш на выходе ФП1 при частоте модуляции 22,5 МГц (рис. 3 а) и 70 МГц (рис. 3 б). Как показало моделирование, при уменьшении значения с/ш меньше 100, существенно возрастает значение $\Delta\varphi_{\text{ПФ1}}$, также при значениях с/ш больше 1000, но не более рабочего значения напряжения ФП1, уменьшение $\Delta\varphi_{\text{ПФ1}}$ незначительно.

На рис. 4 изображена поверхность, иллюстрирующая зависимость погрешности $\Delta\varphi_{\text{ПФ1}}$ от с/ш в диапазоне изменения частоты модулирующего напряжения 22...90 МГц. Эта поверхность получена в результате аппроксимации данных, полученных путем моделирования в NI LabView. Из рис. 4 следует, что погрешность $\Delta\varphi_{\text{ПФ1}}$ не превосходит 5^0 при условиях, что отношение сигнал/шум на выходе ФП1 равен 100, а частота модуляции ПЛИ – 90 МГц, т.е. при наилучших условиях.

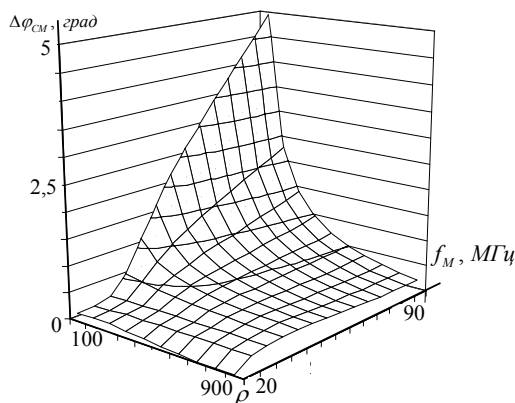


Рис. 4

Заключение. Путем моделирования с помощью средств графического программирования среды NI LabView построена объемная поверхность (рис. 4), которая определяет значение погрешности выходной величины в зависимости от соотношения с/ш на выходе ФП₁ в рабочем диапазоне частот модуляции источника лазерного излучения (зондирующего сигнала). Погрешность определялась с учетом особенностей алгоритма функционирования рассматриваемой частотно-фазовой системы. Место нахождения рабочей точки на полученной поверхности определяет качественные и количественные характеристики ЧФ ИИС. Увеличение значения с/ш уменьшает погрешность выходной величины, вызванной шумами ФП₁,

при этом уменьшается дальность работы системы в целом. С другой стороны, уменьшение значения с/ш увеличивает погрешность измерения при увеличении дальности работы системы. При этом необходимо помнить, что верхний предел значения с/ш ограничен рабочим диапазоном используемого ФП₁, а нижний – практической реализацией системы. Также показано, что значение с/ш пропорционально ответвлению светового потока лазера полупрозрачным зеркалом на объектив ФП₁.

1. Асосков Г.Н., Дейс А.В., Добрачев Ю.П., Исаев А.В., Матвеев А.В. Перспективы использования лазерной локации в гидротехнике и мелиорации // Мат. междунар. конф. «Научно-технологические технологии в мелиорации», Государственное научное учреждение: Всероссийский науч.-исслед. ин-т гидротехники и мелиорации Российской академии сельскохозяйственных наук. – М.: ГНУ ВНИИ Агротехники РАСХН, 2005. – С. 476–482.
2. Брагинец И.А., Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д. Частотно-фазовые лазерные измерители перемещений и вибраций с оптической калибровкой // Техн. электродинамика. – 2011. – № 6. – С. 71–77.
3. Ван дер Зил А. Шумы при измерениях: Пер. с англ./ Под ред. А.К. Нарышкина. – М.: Мир, 1979. – 293 с.
4. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.
5. Глазков М., Кулешов П. Комплекс контрольно-вычислительной аппаратуры скоростного вагона-пути измерителя // CHIP NEWS – М.: ЗАО «Издательский дом «Бурда», 2009. – № 2. – С. 26–29.
6. Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д., Латенко В.И., Орнатский И.А. Специфические погрешности фазово-частотных лазерных измерителей расстояния // Техн. электродинамика. – 2009. – № 3. – С. 50–54.
7. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанопотоника: Учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2011. – 544 с.
8. Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах – М.: Наука, 1968. – 660 с.
9. Медведев Е.М. Методы лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки при выполнении инженерных изысканий // Экспозиция нефть газ. – Набережные Челны: Экспозиция нефть газ, 2010. – № 1/Н. – С. 10–12.
10. Тревис Дж. Тревис Дж. Кринг. LabVIEW для всех: Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 880 с.

УДК 621.317

Є.О. Зайцев, канд. техн. наук
 Інститут електродинаміки НАН України,
 пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
 e-mail: zaitsev@i.ua

Аналіз похибки лазерної частотно-фазової вимірювальної системи, обумовленої впливом шумів гетеродинного фотоприймача

Розглянуто структурну схему частотно-фазової системи, призначеної для визначення відстаней та лінійних переміщень. Особливістю системи є використання оптичного каналу для формування гетеродинного сигналу. У такій структурі зменшується вплив спотворень, пов'язаних з нестабільністю напівпровідникового випромінювача і приймача. Показано, що в розглянутій системі має місце похибка, обумовлена відношенням сигнал/шум на виході фотоприймача гетеродина. Встановлено, що відношення сигнал/шум залежить від значення віддалуження модульованого лазерного потоку напівпрозорим дзеркалом на об'єктив фотоприймача гетеродина. Визначено значення цієї похибки при різному відношенні сигнал/шум у робочому діапазоні частот модуляції джерела лазерного випромінювання. Бібл. 10, рис. 4.

Ключові слова: лазер, частотна модуляція, відстань, гетеродин, похибка.

E.O. Zaitsev

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

e-mail: zaitsev@i.ua

Analysis of error laser multi frequency phase measurement system determined with of noise influence heterodyne photodetector

In paper described is structural diagram of the multi frequency phase system (MFPS) used to determine the distances and linear movement. For making the heterodyne signal used in the optical channel. In this structure reduces the impact of distortions associated with the instability of semiconductor emitter and receiver. It is shown that in the considered system error occurs due to the ratio of signal/noise (s/n) ratio at the output of the photodetector heterodyne. Found that the s/n ratio depends on the value of branch modulated laser beam semi-transparent mirror on the lens sensor oscillator. Determined value of the error at different s/n ratio in the working frequency range of the modulation laser sources. References 10, figures 4.

Key words: laser, frequency modulation, distance, heterodyne, error.

Надійшла 5.08.2013

Received 5.08.2013