

УДК 621.317

**АНАЛИЗ ФАЗОВОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ЧАСТОТЫ  
В ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРАХ**

**И.А.Брагинец**, канд.техн.наук, **Е.А.Зайцев**, канд.техн.наук, **А.Г.Кононенко**, канд.техн.наук,  
**Ю.А.Масюренко**, канд.техн.наук, **В.Е.Сидорчук**, канд.техн.наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина. e-mail: [masjuriv@ied.org.ua](mailto:masjuriv@ied.org.ua)

*Выполнен анализ надежности (устойчивости) работы фазовой системы автоматической коррекции частоты в частотно-фазовых лазерных дальномерах с применением методов численного моделирования. Предложена методика оценки погрешности определения частоты, пропорциональной измеряемому расстоянию, с учетом влияния широкополосного шума. Даны рекомендации по выбору режима работы дальномера в зависимости от значения отношения сигнал-шум с целью обеспечения устойчивой работы системы коррекции частоты выходного напряжения прибора. Библ. 4, табл. 1, рис. 2.*

**Ключевые слова:** лазер, дальномер, модуляция, частота, фаза, коррекция частоты.

В целом ряде случаев мониторинг состояния объектов проводится по результатам измерения расстояния до этих объектов и их перемещений и вибраций. При определении расстояния, например, до вращающихся объектов или объектов, нагретых до высокой температуры, возникает необходимость в применении бесконтактных устройств такого назначения, располагающихся на расстоянии от двух до нескольких десятков метров от контролируемого объекта. Среди последних наиболее высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками обладают оптические измерители расстояния, в частности, лазерные дальномеры [1].

В частотно-фазовых лазерных дальномерах [2], которые являются наиболее перспективными с точки зрения обеспечения необходимой помехоустойчивости, для оценки расстояния лазерное излучение модулируется по интенсивности гармоническими колебаниями высокой частоты, значение которой в процессе работы устройства увеличивается дискретно в заданном диапазоне на определенном временном интервале  $T_0$ . При этом в рассматриваемой дальномерной системе, как показано в [2], формируется выходное напряжение, которое может быть представлено в виде

$$U_{\text{вых}}(i) = U_m \sin(\omega_c \Delta t_\theta i + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $U_m$  – амплитуда напряжения;  $\omega_c$  – угловая частота;  $\Delta t_\theta$  – временной интервал дискретизации частоты модуляции;  $i = 1 \dots N$ ,  $N$  – число дискретных значений частоты модуляции;  $\varphi_0$  – начальный фазовый сдвиг.

Как известно [2], измеряемое расстояние  $L$  в частотно-фазовых дальномерных системах определяется по значению частоты  $f_c = \omega_c / 2\pi$  выходного напряжения (1) в соответствии с формулой

$$f_c = 2L\Delta f / c\Delta t_\theta = \kappa L, \quad (2)$$

где  $\Delta f$  – шаг дискретизации частоты модуляции;  $c$  – скорость света;  $\kappa = 2\Delta f / c\Delta t_\theta$  – постоянный коэффициент.

При практической реализации частотно-фазового дальномера [2] его выходное напряжение (1) формируется в персональном компьютере (ПК) на основании данных ортогональной обработки измерительного сигнала и оценки его квадратурных составляющих. Частота  $f_c$ , пропорциональная измеряемому расстоянию, определяется по спектру напряжения (1), получаемому программным способом с помощью преобразования Фурье. В этом случае точность измерения  $f_c$  зависит от кратности значений  $T_0$  и периода  $T_c = 1/f_c$ , зависящего от значения измеряемого расстояния, равенства частоты ортогональных опорных напряжений частоте исследуемого напряжения и идентичности фазово-частотных характеристик измерительного и опорного каналов дальномера. Кроме этого, на точность оценки частоты напряжения (1) влияет случайная погрешность, обусловленная относительно низким значением отношения сигнал-шум при работе прибора с диффузно-отражающими объектами. Поэтому для повышения точности оценки частоты выходного напряжения дальномера осуществляется ее коррекция на основании сравнения фазовых сдвигов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  выходного напряжения  $U_{\text{вых}}(i)$  относи-

тельно опорного, формируемого в ПК [2]. При этом значения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  находятся из выражений для квадратурных составляющих исследуемого напряжения

$$\begin{aligned} A1 &= U_m \sum_{i=1}^{N/2} \sin \omega_c i \cdot \sin \beta \omega_c i \cdot \psi(i); & A2 &= U_m \sum_{i=1}^{N/2} \sin \omega_c i \cdot \cos \beta \omega_c i \cdot \psi(i); \\ A3 &= U_m \sum_{i=N/2}^N \sin \omega_c i \cdot \sin \beta \omega_c i \cdot \psi(i); & A4 &= U_m \sum_{i=N/2}^N \sin \omega_c i \cdot \cos \beta \omega_c i \cdot \psi(i). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\beta = 1 \pm \delta_f$  – безразмерный коэффициент,  $\delta_f$  – относительная погрешность предварительной оценки частоты  $f_c$ ;  $\psi(i)$  – выделяющая функция Хеннинга,  $\psi(i) = \sin^2(\pi i / N)$  [3]. Тогда

$$\varphi_1 = \arctg(A2 / A1); \quad \varphi_2 = \arctg(A4 / A3). \quad (4)$$

Вычисленная в соответствии с (4) разность  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  используется для коррекции значения измеренной частоты  $f_c$  [2]. Как следует из (3) и (4),  $\Delta\varphi$  зависит от значения  $\delta_f$ . Для упрощения расчетов полагаем, что допустимое значение  $\Delta\varphi$ , при котором обеспечивается работоспособность системы коррекции частоты  $f_c$ , не должно превышать  $\pm\pi/2$  или  $\pm 90^\circ$ .

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы является оценка работоспособности системы коррекции измеренной частоты в частотно-фазовых дальномерных системах с учетом заданных параметров преобразования устройства и значения погрешности предварительного измерения частоты исследуемого сигнала.

Для достижения указанной цели применены методы численного моделирования преобразовательных процессов в схеме дальномера с использованием стандартных программных пакетов. Моделирование проводилось для конкретного примера реализации частотно-фазового дальномера: измеряемое расстояние до диффузно-отражающего объекта  $L = 4$  м; диапазон перестройки частоты модуляции  $f_m$  светового излучения составляет 25...250 МГц; временной интервал преобразования (наблюдения)  $T_0 = 120$  мс; временной интервал дискретизации частоты модуляции  $\Delta t_\delta = 0,2$  мс. Тогда число дискретных значений частоты модуляции  $N = T_0 / \Delta t_\delta = 600$ ; шаг дискретизации частоты модуляции  $\Delta f = 225 / 600 = 0,375$  МГц. Нетрудно показать, что значение  $\Delta\varphi$  в рассматриваемом случае зависит от точности предварительной оценки частоты  $f_c$  выходного напряжения устройства, т.е.  $\Delta\varphi = \pi n \delta_f$ , где  $n$  – число периодов исследуемого сигнала, укладываемых на временном интервале  $T_0$  ( $n = 6$ ).

В качестве модели исследуемого сигнала использовалась сумма выходного напряжения устройства и широкополосной помехи

$$U_\Sigma(i) = U_{\text{вых}}(i) + p(i), \quad (5)$$

где  $p(i)$  – напряжение помехи (шума).

Если длительность  $T_0$  в относительных единицах выбрать равной 600 (по значению числа выборок  $N$ ), то в соответствии с (1) и (2) частота напряжения  $U_{\text{вых}}(i)$  равна  $\omega_c = 2\pi/100$ , а сам сигнал при моделировании может быть представлен в виде  $U_{\text{вых}}(i) = U_m \sin 2\pi i / 100$ . В последнем выражении для упрощения проведения численного моделирования начальная фаза  $\varphi_0$  принята равной нулю, а амплитуда  $U_m$  – равной 1 В. В качестве источника напряжения широкополосной помехи используется создаваемый программным путем генератор последовательности псевдослучайных чисел с регулируемым среднеквадратическим значением шума.

Вид сигнала (5) и его спектр после моделирования показаны на рис. 1 и 2 соответственно. Следует отметить, что для сглаживания картины спектра последний представлен с учетом выделяющей функции, которая в данном случае имеет вид  $\psi(i) = \sin^2(\pi i / N)$ .

Для численной оценки частоты  $f_c$  выходного сигнала измерительной системы по спектру, показанному на рис. 2, использована методика, предложенная в [4]. В соответствии с этой методикой находится центр симметрии кривой  $A(f)$ , построенной путем интерполяции участков между значениями амплитуд отдельных дискретных составляющих спектра от  $f_1$  до  $f_{13}$ . Центр симметрии кривой  $A(f)$  определяется путем использования критерия равенства квадратов площадей  $S_{\text{лев}}$  левой и  $S_{\text{прав}}$  правой половин фигуры, ограниченной кривой  $A(f)$  и участком  $a-b$  на оси абсцисс и разделенной линией, представляющей спектральную составляющую  $f_7$  с максимальной амплитудой. Принятый критерий

учитывает энергетические свойства исследуемого сигнала. При использовании для оценки частоты  $f_c$  спектральных составляющих  $f_1 \dots f_{13}$  значения  $S_{лев}$  и  $S_{прав}$  с некоторым приближением можно найти по формулам

$$S_{лев} = \sum_{j=1}^7 A(f_j) \cdot (f_j - f_{j-1}); \quad S_{прав} = \sum_{j=7}^{13} A(f_j) \cdot (f_{j+1} - f_j), \quad (6)$$

где  $A(f_j)$  и  $f_j, f_{j-1}, f_{j+1}$  – соответственно амплитуды и частоты спектральных составляющих сигнала;  $j=1 \dots 13$ .

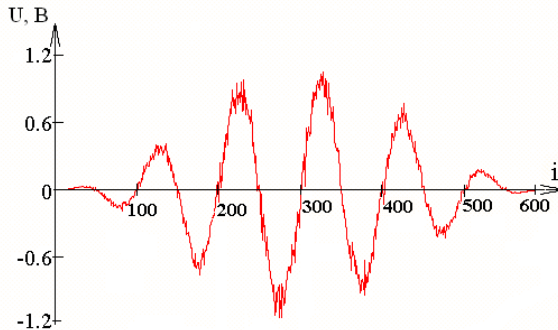


Рис. 1

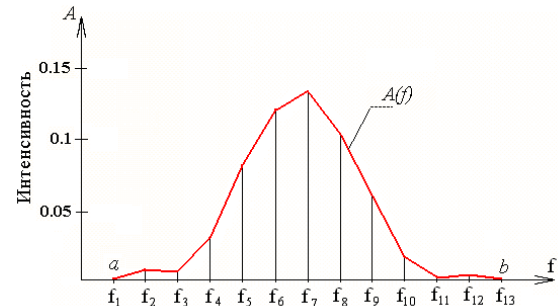


Рис. 2

Поскольку разности  $(f_j - f_{j-1})$  и  $(f_{j+1} - f_j)$  в выражениях (6) при всех значениях  $j$  одинаковы и представляют собой шаг дискретизации (частотное разрешение)  $\Delta f$  при спектральном представлении исследуемого гармонического сигнала, то квадраты площадей  $S_{лев}$  и  $S_{прав}$  будут иметь вид

$$S_{лев}^2 = \Delta f^2 \sum_{j=1}^7 A^2(f_j); \quad S_{прав}^2 = \Delta f^2 \sum_{j=7}^{13} A^2(f_j). \quad (7)$$

Если  $\Delta_S = S_{лев}^2 - S_{прав}^2 = 0$ , то  $f_c = f_7$ ; при  $\Delta_S > 0$   $-f_6 < f_c < f_7$ , а при  $\Delta_S < 0$  значение  $f_c$  соответствует условию  $f_7 < f_c < f_8$ . Так, например, при  $\Delta_S > 0$  вычисляются квадраты площадей, разделенных линией спектральной составляющей  $f_6$  (рис. 2), и определяется их разность

$$(S^2)'_{лев} = \Delta f^2 \sum_{j=1}^6 A^2(f_j); \quad (S^2)'_{прав} = \Delta f^2 \sum_{j=6}^{13} A^2(f_j); \quad (\Delta_S)' = (S^2)'_{лев} - (S^2)'_{прав}. \quad (8)$$

Если  $(\Delta_S)' < 0$ , то действительное значение частоты  $f_c$  равно

$$f_c = f_6 + \Delta f \cdot \alpha, \quad (9)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности,  $0 \leq \alpha \leq 1$ , определяется по формуле [4]

$$\alpha = \left[ (S^2)'_{прав} - (S^2)'_{лев} \right] \left[ (S^2)'_{прав} - (S^2)'_{лев} - S_{прав}^2 + S_{лев}^2 \right]^{-1}. \quad (10)$$

Если при сравнении вновь  $(\Delta_S)' > 0$ , то линия раздела площади всей фигуры проводится через точку  $f_5$  и определяется значение  $f_c$  по описанной выше методике.

Аналогичным образом можно определить  $f_c$  в случае, когда при первоначальном сравнении  $S_{лев}^2$  и  $S_{прав}^2$  разность  $\Delta_S < 0$ . Тогда общая площадь фигуры на рис. 2 разделяется линией спектральной составляющей  $f_8$  и проводятся соответствующие вычисления.

Для численной оценки погрешности предварительного измерения частоты  $f_c$  моделирование проводилось на основании модели исследуемого сигнала (5) сначала без учета действия помехи  $p(i)$ . В результате этого установлено, что погрешность оценки  $f_c$  при использовании описанной выше методики составляет  $\delta_f = 0,5 \dots 1$  %. Тогда значение  $\Delta \varphi$  не превышает  $\Delta \varphi = \pi n \delta_f = 0,06 \pi$ , т.е. в рассматриваемом случае обеспечивается надежная работа системы коррекции частоты выходного напряжения дальномера.

Методика оценки погрешности предварительного измерения частоты исследуемого сигнала (5) с учетом действия помехи  $p(i)$  состоит в следующем.

Вначале по спектрограмме, полученной без учета действия шумов, в соответствии с (7) вычисляем относительное значение разности квадратов площадей  $\delta_S = 0,5(S_{лев}^2 - S_{прав}^2)(S_{лев}^2 + S_{прав}^2)^{-1}$ . Затем, изменяя частоту напряжения  $U_{вых}(i) = \sin 2\pi i/100$  на 0,1 %, вновь определяем относительную

разность квадратов площадей левой и правой половин фигуры, найденной при изменении частоты:  $(\delta_S)_1 = 0,5[(S_{лев}^2)_1 - (S_{прав}^2)_1][(S_{лев}^2)_1 + (S_{прав}^2)_1]^{-1}$ . Вычисляем разность  $\Delta_{\delta_S} = \delta_S - (\delta_S)_1$  и фиксируем ее значение.

После этого обращаемся к спектрограмме, полученной при номинальном значении частоты напряжения (5) и действии шумовой помехи  $p(i)$ , и в этом случае оцениваем разность квадратов ее площадей:  $(\delta_S)_2 = 0,5[(S_{лев}^2)_2 - (S_{прав}^2)_2][(S_{лев}^2)_2 + (S_{прав}^2)_2]^{-1}$ . Тогда относительное значение погрешности предварительной оценки частоты выходного напряжения дальномера, обусловленной действием шума, при выбранном отношении сигнал-шум, равном 100, определяется по формуле  $\delta_{f_{из}} = (\delta_S)_2 / \Delta_{\delta_S}$ . Отсюда вычисленное среднеквадратическое относительное значение погрешности  $\delta_{f_{из}} = 0,0111$ . Для повышения достоверности оценки работоспособности системы автоматической коррекции частоты при определении  $\Delta\varphi$  берется удвоенное значение  $\delta_{f_{из}}$ . Тогда  $\Delta\varphi = \pi n \delta_{f_{из}} = 23,84$  градуса.

$\rho$	25	30	35	50	100	200
$\Delta\varphi$ , град	165,24	137,97	87,71	69,94	23,84	16,22

Вычисленные значения  $\Delta\varphi$  при различных отношениях сигнал-шум  $\rho$  приведены в таблице.

**Вывод.** Применение предложенного алгоритма коррекции частоты выходного напряжения дальномера возможно при  $\rho \geq 35$ . В этом случае значение  $\Delta\varphi$ , обусловленное среднеквадратической погрешностью измерения частоты  $\delta_{f_{из}}$ , не превышает  $90^\circ$ . Для обеспечения надежной работы системы коррекции частоты при меньших значениях  $\rho$  необходимо увеличивать количество циклов измерения в соответствии с общим алгоритмом работы дальномера и затем (перед определением  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ ) усреднять результаты многократных оценок значений  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .

1. Михеечев В.С. Геодезические светодальномеры. – М.: Недра, 1979. – 222 с.
2. Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д., Латенко В.И., Орнатский И.А. Особенности применения фазово-частотного метода в лазерной дальнометрии // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 6. – С. 65–70.
3. Грибанов Ю.И., Мальков В.Л. Спектральный анализ случайных процессов. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
4. 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 // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 3. – С. 50–54.

#### АНАЛІЗ ФАЗОВОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ КОРЕКЦІЇ ЧАСТОТИ В ЛАЗЕРНИХ ДАЛЕКОМІРАХ

І.О.Брагинець, Є.О.Зайцев, О.Г.Кононенко, Ю.О.Масюренко, В.Є.Сидорчук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

E-mail: [masiuriv@ied.org.ua](mailto:masiuriv@ied.org.ua)

Виконано аналіз надійності (стійкості) роботи фазової системи автоматичної корекції частоти в частотно-фазових лазерних далекомірах із застосуванням методів чисельного моделювання. Запропоновано методику оцінки похибки визначення частоти, пропорційної вимірюваній відстані, з урахуванням впливу широкопasmового шуму. Дано рекомендації щодо вибору режиму роботи далекоміра в залежності від значення відношення сигнал-шум з метою забезпечення стійкої роботи системи корекції частоти вихідної напруги приладу. Бібл. 4, табл. 1, рис. 2.

**Ключові слова:** лазер, далекомір, модуляція, частота, фаза, завада, корекція частоти.

#### ANALYSIS OF PHASE SYSTEM OF AUTOMATIC FREQUENCY CORRECTION IN LASER RANGEFINDER

I.O.Bragynets, Ye.O.Zaitsev, O.G.Kononenko, Yu.O.Masiurenko, V.Ye.Sydorchuk

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

E-mail: [masiuriv@ied.org.ua](mailto:masiuriv@ied.org.ua)

The analysis of reliability (stability) of the phase system automatic frequency correction in the frequency-phase laser rangefinders with application of numerical methods has been carried out. An estimation method for determining the accuracy of the frequency proportional to the measured distance with the influence of broadband noise has been proposed. Advices on selecting mode rangefinder depending on the value of the signal-to-noise ratio in order to ensure stable operation of the system frequency correction of device output voltage have been done. References 4, table 1, figures 2.

**Key words:** laser, rangefinder, modulation, frequency, phase, noise, frequency correction.

1. Mikheev V.S. Ladar-surveying optical rangefinders. – Moskva: Nedra, 1979. – 222 p. (Rus)
2. Zaitsev E.A., Kononenko A.G., Masiurenko Yu.A., Nizhenskii A.D., Latenko V.I., Ornatkii I.A. Special features of a phase-frequency method application in a laser ranging // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2008. – № 6. – Pp. 65–70. (Rus)
3. Gribanov Yu.I., Malkov V.L. Spectral analysis of stochastic processes. – Moskva: Energiia, 1974. – 240 p. (Rus)
4. Zaitsev E.A., Kononenko A.G., Masiurenko Yu.A., Nizhenskii A.D., Latenko V.I., Ornatkii I.A. Specific errors of phase-frequency laser distance meters // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2009. – № 3. – Pp. 50–54. (Rus)

Надійшла 14.04.2014