

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВОГО СДВИГА 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
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.
e-mail: masjuriy@ied.org.ua

Определены основные источники погрешности измерения фазовых лазерных дальнометров. Для повышения точности дальнометра предложено применить компенсационное измерение фазового сдвига, пропорционального измеряемому расстоянию. При этом в качестве высокоточного фазовращателя использована калиброванная световолоконная линия, обеспечивающая необходимый фазовый сдвиг при изменении частоты модуляции. Разработана соответствующая структурная схема фазового дальнометра и описана ее работа. Проведена оценка точности предложенного дальнометра, подтверждающая эффективность примененного метода измерения фазового сдвига. Библ. 8, рис. 1.

Ключевые слова: лазер, фазовый дальнометр, компенсационное измерение, фазовращатель, калиброванная световолоконная линия, переменная частота модуляции.

Расширение круга задач, решаемых с помощью лазерных дальнометров, неразрывно связано с повышением метрологических характеристик последних. В настоящее время при мониторинге состояния некоторых специальных объектов требуется проводить измерения линейных перемещений с погрешностью 0,1...0,5 мм на расстоянии до 100 м. При этом значение перемещения определяется по изменению расстояния до контролируемого объекта относительно его базового значения. Указанное требование к точности измерения заставляет искать новые пути совершенствования лазерных дальнометров.

Среди лазерных дальнометров наиболее высокой точностью обладают устройства, основанные на фазовом методе измерения расстояния. В таких приборах расстояние до контролируемого объекта оценивается по изменению фазы огибающей непрерывного модулированного светового сигнала при прохождении им двойного измеряемого расстояния [3]. В этом случае фазовый сдвиг φ_x принятого сигнала относительно опорного напряжения определяется выражением

$$\varphi_x = 2\pi \cdot 2L_x / \lambda = 4\pi \cdot L_x f_m / c, \quad (1)$$

где L_x – измеряемое расстояние; λ – длина волны модулирующего напряжения лазерного излучения; f_m – частота модулирующего напряжения; c – скорость света.

Таким образом, расстояние до объекта

$$L_x = c\varphi_x (4\pi f_m)^{-1}. \quad (2)$$

Как следует из (2), точность определения L_x зависит от погрешности измерения фазового сдвига φ_x и стабильности f_m при изменении температуры окружающей среды.

Погрешность измерения расстояния зависит от погрешности измерения фазового сдвига $\Delta\varphi_x$ согласно выражения

$$\Delta L_x = c\Delta\varphi_x (4\pi f_m)^{-1}. \quad (3)$$

Фазовый лазерный дальнометр, исходя из принципа его работы, содержит приемопередающую систему, измерительный и опорный электрические каналы, фазоизмерительное устройство, отсчетное устройство и блок управления и обработки данных. В соответствии со структурой дальнометра погрешность $\Delta\varphi_x$ зависит от фазовых искажений, вносимых приемопередающей системой, измерительным и опорным каналами, содержащими электронные узлы, а также от погрешности непосредственно фазоизмерительного устройства.

Фазовые искажения, вносимые приемопередающей системой, а также нестабильностью и неидентичностью фазовых характеристик каналов дальнометра, можно существенно уменьшить за счет

применения оптической калибровки прибора. В этом случае в схему дальномера вводится контрольный оптический канал, который может быть выполнен либо путем ответвления части оптического излучения на фотоприемник [7], либо с использованием дополнительного оптического излучателя [6]. Перед каждым измерением расстояния выполняется калибровочное измерение длины контрольного оптического канала. Результат контрольного измерения вычитается из результата измерения расстояния, которое осуществляется сразу после контрольного измерения.

Однако даже при наличии оптической калибровки прибора на результат измерения расстояния оказывает влияние погрешность фазоизмерительного устройства. Это объясняется тем, что оптическая калибровка производится в одной точке диапазона измеряемых фазовых сдвигов, а не для всех значений. Современные цифровые фазометры при их использовании в схеме дальномера могут обеспечивать измерение сдвига фаз при определенном отношении сигнал-шум на выходе фотоприемника с погрешностью порядка $0,1^\circ$. Так, например, при частоте модуляции, равной 50 МГц, погрешность измерения расстояния, вносимая фазоизмерительным устройством, в соответствии с (3) равна $(\Delta L_x)_{\varphi_V} = 0,8$ мм. Повышение частоты модуляции f_m для уменьшения $(\Delta L_x)_{\varphi_V}$ не является эффективным, поскольку в этом случае увеличивается уровень дробовых шумов на выходе фотоприемника, в качестве которого используется, как правило, лавинный фотодиод [1]. Вследствие этого ухудшается отношение сигнал-шум, и для обеспечения заданной точности измерения требуется усреднение результатов отдельных измерений, что приводит к увеличению времени измерения перемещения.

Для определения погрешности, обусловленной нестабильностью частоты модуляции f_m , продифференцируем расстояние L_x в формуле (2) по частоте f_m

$$|\partial L_x / \partial f_m| = c \varphi_x (4\pi f_m^2)^{-1}.$$

Тогда погрешность $(\Delta L_x)_{f_m}$ в зависимости от флуктуаций частоты f_m примет вид

$$(\Delta L_x)_{f_m} = c \varphi_x (4\pi f_m^2)^{-1} \Delta f_m,$$

где Δf_m – отклонение частоты f_m от номинального значения.

Из последней формулы видно, что максимальное значение $(\Delta L_x)_{f_m}$ будет при $\varphi_x = 2\pi$. Тогда $(\Delta L_x)_{f_m} = c(2f_m^2)^{-1} \Delta f_m$.

Для определения Δf_m воспользуемся паспортными данными на типовой кварцевый генератор с номинальной частотой генерации $f_{m_{ном}} = 50$ МГц (например, УГК45-П-50,0М), в соответствии с которыми в интервале рабочих температур $(25 \pm 15)^\circ\text{C}$ относительное отклонение частоты $\delta_f = 10^{-5}$.

Отсюда $\Delta f_m = f_{m_{ном}} \cdot \delta_f = 50 \cdot 10^{-5}$ МГц и $(\Delta L_x)_{f_m} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 50^2} 50 \cdot 10^{-5} \approx 0,03$ мм.

Очевидно, что данная составляющая погрешности менее значима, чем погрешность, вносимая фазоизмерительным устройством (0,8 мм).

В связи с предварительно проведенным анализом целью данной работы является исследование возможности повышения точности фазовых лазерных дальномеров за счет уменьшения погрешности измерения фазового сдвига выходных сигналов измерительного и опорного каналов дальномера и на основании этого разработка новой структуры таких приборов.

Потенциально более высокой точностью по сравнению с фазометрами непосредственного отсчета обладают фазоизмерительные устройства компенсационного типа с использованием фазовращателей [3]. Однако применение в качестве фазовращателя электрической линии задержки сигналов из-за ее нестабильности и точности, особенно на высоких частотах (десятки и сотни мегагерц), что имеет место в фазовых дальномерах, не позволяет достичь указанной цели.

Эффективным и известным методом повышения точности фазовых дальномеров, в которых разность фаз может измеряться компенсационным способом без применения электрической линии задержки, является изменение частоты модуляции f_m таким образом, чтобы $\varphi_x \approx 0$ [3]. Тогда расстояние определяется в соответствии со значением f_m , то есть эталоном является частота. Недостатком в таком случае является то, что чувствительность устройства зависит от значения измеряемого расстояния.

Известны также фазовые лазерные дальномеры [3], где в качестве высокоточного фазовращателя используется оптическая калибровочная линия переменной длины. Излучение лазера в этом

случае сначала направляется на контролируемый объект, а затем на оптическую линию. Изменяя механически длину пути, проходимого световым потоком в этой линии, добиваются такой же разности фаз, как и при измерении дальности до контролируемого объекта. В этом случае длина пути, определяемая с высокой точностью непосредственным отсчетом по шкале оптической калибровочной линии, является мерой при измерении расстояния. Очевидными недостатками в этом случае являются существенное увеличение времени измерения, а также громоздкость и сложность конструкции дальномера.

На основании данных исследований для повышения точности измерения расстояния в соответствии с поставленной целью работы в схеме лазерного дальномера в качестве высокоточного фазовращателя предлагается использовать калиброванную световолоконную линию постоянной длины, обеспечивающую необходимый фазовый сдвиг при изменении частоты модуляции [2]. В этом случае вносимый фазовый сдвиг равен

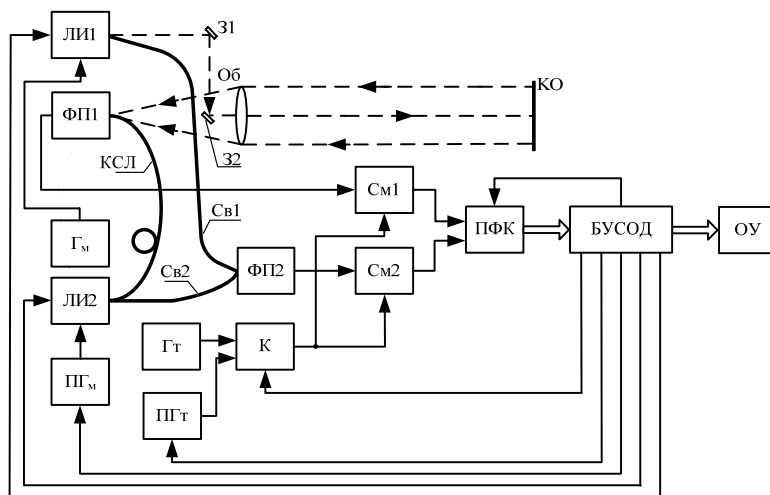
$$\varphi_{\Phi B} = 2\pi c^{-1} L_0 f_{m1}, \quad (4)$$

где L_0 – длина оптического пути, проходимого световым излучением через калиброванную световолоконную линию; f_{m1} – перестраиваемая частота модуляции.

Принцип работы такого дальномера состоит в следующем. Вначале измеряется расстояние до контролируемого объекта. В этом случае модулированный с заданной частотой f_m световой поток направляется на контролируемый объект и в соответствии с (1) определяется фазовый сдвиг между излучаемым и принимаемым световыми потоками. Затем на вход той же приемной системы направляется модулированное излучение через калиброванную световолоконную линию. Изменяя частоту модуляции f_{m1} в выражении (4), добиваемся равенства $\varphi_{\Phi B} = \varphi_X$. Тогда значение измеряемого расстояния можно определить по формуле

$$L_X = L_0 f_{m1} (2f_m)^{-1}. \quad (5)$$

Поскольку значение частоты f_{m1} при ее перестройке может быть выставлено с высокой точностью, например, с помощью цифрового синтезатора частоты, то применение указанного фазовращателя позволяет существенно уменьшить влияние погрешности фазометра на результат измерения расстояния. При этом фазовые искажения, возникающие в приеме-передающих оптических системах и электронных каналах дальномера, так же, как и при использовании известных методов оптической калибровки, взаимно исключаются и не оказывают влияния на точность измерения расстояния.



На рисунке показана структурная схема фазового лазерного дальномера, в котором реализован описанный выше принцип измерения расстояния. На схеме приняты следующие обозначения: ЛИ1, ЛИ2 – лазерные полупроводниковые излучатели; G_m – генератор модулирующего напряжения; G_t – гетеродин; ПГ – перестраиваемый генератор; ПГт – перестраиваемый гетеродин; Св1, Св2 – световоды; КСЛ – калиброванная световолоконная линия; ФП1, ФП2 – фотоприемники; К – коммутатор; СМ1, СМ2 – смесители; ПФК – преобразователь фазовый сдвиг-код; БУСОД – блок управления, сбора и обработки данных; ОУ – отсчетное устройство; 31, 32 – зеркала; Об – объектив; КО – контролируемый объект.

Работа дальномера осуществляется в два такта. В первом такте электрический сигнал модулирующей частоты поступает от генератора G_m на вход лазерного излучателя ЛИ1. Модулированный световой поток от излучателя ЛИ1 с помощью зеркал 31 и 32 через объектив Об в виде узконаправленного пучка лучей направляется на контролируемый объект КО. Одновременно световой поток от излучателя ЛИ1 по световоду Св1 поступает на вход фотоприемника ФП2 и используется как опорный. Отраженный от КО световой поток вновь проходит через объектив Об, фокусируется им и попадает на вход фотоприемника ФП1. Измерение разности фаз φ_X излучаемого и принимаемого све-

товых потоков осуществляется на промежуточной частоте, полученной в результате гетеродинирования. С этой целью электрические сигналы с выходов фотоприемников ФП1 и ФП2 поступают на первые входы соответственно смесителей СМ1 и СМ2, на вторые входы которых через коммутатор К подается выходной сигнал гетеродина Гт. Выходные напряжения смесителей СМ1 и СМ2 поступают на входы преобразователя ПФК. В последнем осуществляется преобразование φ_x в числовой эквивалент, выраженный в виде кода $N_1 = k\varphi_x$, где k – коэффициент преобразования. Значение N_1 переносится в блок БУСОД и запоминается в оперативной памяти.

Во втором такте работы дальномера отключается излучатель ЛИ1 и включается излучатель ЛИ2, на вход которого поступает выходное напряжение перестраиваемого генератора ПГ_м. Управление поочередной работой излучателей ЛИ1 и ЛИ2 осуществляется путем включения или выключения подаваемого на них напряжения питания командными сигналами, поступающими от блока БУСОД.

Световой поток от излучателя ЛИ2 по калиброванной световолоконной линии КСЛ направляется на вход фотоприемника ФП1 измерительного канала дальномера. Это же излучение по световоду Св2 направляется на вход фотоприемника ФП2 опорного канала. Длина L_0 калиброванной световолоконной линии КСЛ выбирается кратной длине волны модулирующего напряжения лазерного излучения, направляемого на контролируемый объект КО. Конструктивно КСЛ может быть изготовлена с использованием световода выбранной длины путем свертывания его в кольцо, что делает КСЛ достаточно компактной. Далее, как это описано выше, определяется фазовый сдвиг между выходными электрическими сигналами фотоприемников ФП1 и ФП2. В этом случае на вторые входы смесителей СМ1 и СМ2 через коммутатор К, переключенный сигналом блока БУСОД в другое положение, подается напряжение перестраиваемого гетеродина ПГт. Частоты ПГ_м и ПГт изменяются синхронно таким образом, чтобы промежуточная частота была такая же, как и при измерении расстояния до контролируемого объекта.

Первоначально частота ПГ_м устанавливается равной $f_{m1н} = f_{m1макс} / 2$, где $f_{m1макс}$ – максимальное значение частоты перестройки. Значение $f_{m1макс}$ определяется фазовым сдвигом, равным 2π , устанавливаемым с помощью применяемого фазовращателя. Тогда, в соответствии с (4), $f_{m1макс} = c/L_0$, а $f_{m1н} = c/2L_0$.

Первое измерение в этом такте работы прибора осуществляется с помощью ПФК путем преобразования фазового сдвига $\varphi_{\phiВ}$ в цифровой эквивалент, выраженный в виде кода $N_2 = k\varphi_{\phiВ}$. В блоке БУСОД оценивается разность $\Delta N = N_1 - N_2$, знак которой определяет направление изменения (уменьшение или увеличение) частоты модуляции f_{m1} . После этого по сигналам блока БУСОД осуществляется перестройка частоты генератора ПГ_м и гетеродина ПГт до момента, когда $\Delta N = 0$. При этом фиксируется текущее значение f_{m1} и, в соответствии с (5), блоком БУСОД вычисляется значение $L_x = L_0 f_{m1} / f_m$, которое в единицах длины высвечивается на цифровом табло отсчетного устройства ОУ.

Оценим составляющие погрешности измерения L_x , вызванные присутствием в формуле для определения расстояния величин L_0 , f_m и f_{m1} .

Стабильность оптического пути L_0 , проходимого световым потоком по калиброванной линии КСЛ, зависит от изменения длины оптического волокна в линии и возникающих деформационных изменений показателя преломления кварцевого стекла оптического волокна при изменении температуры. При этом в соответствии с [4] суммарное относительное изменение длины L_0 , ввиду указанных выше причин, может составлять $0,68 \cdot 10^{-5}$ на один градус Цельсия. При помещении КСЛ в пассивный термостат, внутри которого при температуре окружающего воздуха $(25 \pm 15)^\circ\text{C}$ поддерживается неоднородность температурного поля не более $\pm 1^\circ\text{C}$, относительное изменение L_0 равно $\delta_{L_0} = 0,68 \cdot 10^{-5}$. Если частота модуляции $f_m = 50$ МГц, а $\lambda_s = 3000$ мм, то L_0 можно выбрать равной $L_0 = 3\lambda_s = 9000$ мм. В этом случае изменение частоты ПГ_м не превышает 33% при измерении расстояния в широком диапазоне, т.е. 16,5 МГц. Тогда составляющая погрешности измерения L_x будет равна $\Delta L_x = L_0 \delta_{L_0} f_{m1} / 2f_m = 9000 \cdot 0,68 \cdot 10^{-5} \cdot 16,5 / (2 \cdot 50,0) \approx 0,01$ мм.

Для оценки погрешности $\Delta L'_x$, обусловленной нестабильностью частоты модуляции f_m , продифференцируем расстояние L_x в формуле (5) по частоте f_m

$$|\partial L_x / \partial f_m| = L_0 f_{m1} (2f_m^2)^{-1}. \quad (6)$$

Тогда погрешность $\Delta L'_x$ в зависимости от флуктуаций частоты f_m примет вид

$$\Delta L'_x = L_0 f_{m1} (2f_m^2)^{-1} \Delta f_m, \quad (7)$$

где Δf_m – отклонение частоты f_m от номинального значения. В свою очередь, как это показано выше, $\Delta f_m = 50 \cdot 10^{-5}$ МГц. Тогда в соответствии с (7) $\Delta L'_x \approx 0,015$ мм.

Составляющая погрешности измерения расстояния $\Delta L''_x$ из-за неточного значения частоты f_{m1} может быть обусловлена как установкой этой частоты, так и ее нестабильностью при изменении температуры. В предлагаемом устройстве в качестве перестраиваемых генератора ПГ и гетеродина ПГТ можно использовать управляемые цифровые синтезаторы частоты, выполненные на основе микросхемы AD9851 [5]. Выходная частота таких устройств определяется соотношением

$$f_{\text{вых}} = N_x \cdot 6 \cdot f_{\text{оп}} / 2^{32}, \quad (8)$$

где N_x – десятичное значение 32-разрядного слова настройки выходной частоты; $f_{\text{оп}}$ – значение опорной частоты синтезатора, $f_{\text{оп}} = 30$ МГц.

Как видно из уравнения (8), погрешность синтезатора частоты может быть вызвана лишь нестабильностью генератора опорной частоты. Если в качестве генератора опорной частоты 30 МГц для цифрового синтезатора применить кварцевый генератор УГК45-П-30,0 М, то в интервале рабочих температур (25 ± 15) °С относительное отклонение опорной частоты синтезатора $\delta_{f_{\text{оп}}}$ составляет 10^{-5} .

Тогда составляющая погрешности $\Delta L''_x$ равна

$$\Delta L''_x = \frac{L_0 \cdot f_{m1} \cdot \delta_{f_{\text{оп}}}}{2f_m} = \frac{9000 \cdot 16,5 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 50,0} \approx 0,015 \text{ мм.}$$

На основании вычисленных значений составляющих погрешности измерения ΔL_x , $\Delta L'_x$ и $\Delta L''_x$ с учетом того, что последние коррелированы между собой, найдем результирующую погрешность измерения расстояния (перемещения)

$$(\Delta L_x)_\Sigma = \Delta L_x + \Delta L'_x + \Delta L''_x = 0,04 \text{ мм.}$$

Таким образом, при использовании относительно низкой частотной модуляции (50 МГц) суммарная погрешность определения расстояния при реализации предложенного компенсационного метода измерения фазового сдвига уменьшается более, чем на порядок по сравнению с дальномерами с непосредственным отсчетом фазового сдвига. Для сравнения отметим, что в лазерной дальномерной системе, созданной для контроля поверхности зеркала диаметром 100 м параболического радиотелескопа Green Bank Telescope национальной радиоастрономической обсерватории США, высокая точность (лучше 0,1 мм) достигается при частоте модуляции 1 ГГц [8].

Выводы. Как показали результаты проведенного расчета погрешности измерения расстояния, применение компенсационного метода измерения фазового сдвига в лазерном дальномере с использованием высокоточного фазовращателя в виде калиброванной световолоконной линии, обеспечивающей необходимый фазовый сдвиг при изменении частоты модуляции, дает возможность достичь заданной точности измерения расстояния (0,1...0,5 мм). При этом применение относительно низкой частоты модуляции светового излучения (25...50 МГц), направляемого на контролируемый объект, позволяет снизить интенсивность дробовых шумов фотоприемника и тем самым уменьшить случайную погрешность измерения расстояния, обусловленную их влиянием. В этом случае повышается не только точность определения расстояния, но и быстродействие дальномера за счет уменьшения времени усреднения результатов отдельных измерений.

1. Брагинец И.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д. Исследование лазерных измерителей расстояния до нагретых объектов // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2005. – № 2(11). – Ч.2. – С. 114-117.

2. Брагинец І.О., Жукинський І.М., Зайцев Є.О., Кононенко О.Г., Масюренко Ю.О. Лазерний далекомір. Патент на корисну модель № 91534, Україна, МПК (2006.01), G01C 3/08.

3. Михеечев В.С. Геодезические светодальномеры. – М.: Недра, 1979. – 222 с.
4. Okosi T., Okamoto K., Otsu M., Nisikhara X., Kioma K., Khatatэ K. Волоконно-оптические датчики. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
5. AD9851 CMOS 180 MHz DDS/DAC Synthesizer Data Sheet [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9851/pdf
6. Fumio Ohtomo. Optical range finder. US Patent US 4531833, G01C3/08.
7. Joerg Stierle, Peter Wolf, Kai Renz. Device and method for optical distance measurement. US Patent US 7221435, G01C3/08.
8. Request for Proposals, the Green Bank Telescope. Technical Report, Associated Universities, Inc., National Radio Astronomy Observatory. June 1990.

ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЕНСАЦІЙНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ФАЗОВОГО ЗСУВУ В ЛАЗЕРНИХ ДАЛЕКОМІРАХ

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

**Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,**

e-mail: masjuriy@ied.org.ua

Визначено основні джерела похибки вимірювання фазових лазерних далекомірів. Для підвищення точності далекоміра запропоновано застосувати компенсаційне вимірювання фазового зсуву, пропорційного вимірюваній відстані. При цьому як високоточний фазообертач використано калібровану світловолоконну лінію, що забезпечує необхідний фазовий зсув при зміні частоти модуляції. Розроблено відповідну структурну схему фазового далекоміра та описано її роботу. Проведено оцінку точності запропонованого далекоміра, що підтверджує ефективність застосованого методу вимірювання фазового зсуву. Бібл. 8, рис. 1.

Ключові слова: лазер, фазовий далекомір, компенсаційне вимірювання, фазообертач, калібрована світловолоконна лінія, змінна частота модуляції.

APPLING OF COMPENSATORY MEASURING METHOD OF PHASE SHIFT FOR LASER RANGE FINDER

I.O.Brahynets, Ye.O.Zaitsev, O.H.Kononenko, Yu.O.Masjurenko

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

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

e-mail: masjuriy@ied.org.ua

The study has tested the main sources of measurement error of phase laser range finders. To improve the accuracy of the range finder we have proposed to apply compensatory measurement of the phase shift is proportional to the measured distance. At the same time as a high-precision phase shifter we used a calibrated fiber-optic line, provides the necessary phase shift when changing the modulation frequency. We have developed appropriate block diagram of the phase range finder and described her work. We have accessed the accuracy of the proposed rangefinder confirming the effective application of the method of measurement of the phase shift. References 8, figure 1.

Keywords: laser, phase rangefinder, compensatory measurement, phase shifter, calibrated fiber-optic line, a variable frequency modulation.

1. Braginets I.A., Kononenko A.G., Masjurenko Yu.A., Nizhenskii A.D. Research of laser distance meter to hot objects // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2005. –No 2(11). – Vol. 2. – С. 114-117. (Rus)

2. Bragynets I.O., Zhukynskiy I.M., Zaitsev E.O., Kononenko O.G., Masjurenko Yu.O. Laser Rangefinder. Patent for Utility Model № 91534, Ukraine, IPC (2006.01), G01C 3/08. (Ukr)

3. Mikheechev V.S. Ladsurveying optical rangefinders. – Moskva: Nedra, 1979. – 222 p. (Rus)

4. Okosi T., Okamoto K., Otsu M., Nisikhara Kh., Kioma K., Khatate K. Fiber Optic Sensors. – Leningrad: Energoatomizdat, 1990. – 256 p. (Rus)

5. AD9851 CMOS 180 MHz DDS/DAC Synthesizer Data Sheet [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9851/pdf

6. Fumio Ohtomo. Optical range finder. US Patent US 4531833, G01C3/08.

7. Joerg Stierle, Peter Wolf, Kai Renz. Device and method for optical distance measurement. Patent US 7221435, G01C3/08.

8. Request for Proposals, the Green Bank Telescope. Technical Report, Associated Universities, Inc., National Radio Astronomy Observatory. June 1990.

Надійшла 25.11.2014
Остаточний варіант 08.01.2015