

Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн

УДК 681.786.2

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-2-73-81>

Приемное устройство прецизионного импульсного лазерного дальномера

В. А. Головков[✉], Н. И. Потапова, П. Н. Руденко, Б. Г. Страдов, С. В. Телятников

АО "Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения",
Сосновый Бор, Россия

[✉]golovkov_ggg@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время наибольшей точностью оценки дальности обладают лазерные дальномеры, использующие фазовые методы измерения, оценивающие дальности с точностью до единиц миллиметров. Однако эти методы пригодны для оценки дальности только до малоподвижных объектов и не работоспособны в условиях быстро изменяющейся фоновой обстановки. В этой связи необходима разработка и расчет характеристик приемных частей прецизионного импульсного лазерного дальномера, использующего созданные лазерные источники излучения с длительностью зондирующих импульсов в единицы наносекунд. Такой дальномер позволит добиться высокой точности оценки дальности, приближающейся по точности к параметрам фазовых дальномеров, для высокодинамичной фоновой обстановки.

Цель работы. Разработка приемной части импульсного лазерного дальномера с прецизионными характеристиками; определение точности его измерений; описание его аппаратного обеспечения.

Материалы и методы. Рассмотрено построение приемной части прецизионного импульсного лазерного дальномера с двухшкальной цифровой системой оценки дальности, реализуемой подсчетом импульсов тактового генератора и аналоговым интегратором, уточняющим дискретную оценку дальности. С использованием аппарата математической статистики определены энергетические характеристики дальномера: точность оценки дальности и вероятность ложной тревоги, обеспечиваемые разработанной схемой. Описано аппаратное обеспечение прецизионного лазерного дальномера.

Результаты. Приведены принципы реализации приемной части лазерного дальномера с двухшкальной цифровой системой оценки дальности до объекта. Получены результаты численного моделирования характеристик дальномера, подтверждающие точность оценки дальности порядка миллиметров. В реализованной схеме дальномера вероятность ложной тревоги составила 10^{-4} при наблюдении реализации смеси сигнала с шумом в продолжение 200 с. Предложено аппаратное обеспечение прецизионного лазерного дальномера с цифровой двухшкальной оценкой дальности.

Заключение. Реализованный лазерный дальномер по потенциальной точности оценки дальности до объекта порядка миллиметров приближается к возможностям фазовых лазерных дальномеров, при этом реализует указанный параметр в условиях быстро изменяющейся фоновой обстановки. Использование коротких зондирующих импульсов длительностью 10...20 нс позволяет добиться разрешающей способности до 1.5 м. В отличие от фазовых дальномеров дальность может быть оценена по одному зондирующему импульсу.

Ключевые слова: дальномер, лавинные фотодиоды, инфракрасный диапазон, объектив, зондирующий импульс, отношение сигнал/шум, пороговый уровень, грубая и точная шкала дальности

Для цитирования: Приемное устройство прецизионного импульсного лазерного дальномера / В. А. Головков, Н. И. Потапова, П. Н. Руденко, Б. Г. Страдов, С. В. Телятников // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 2. С. 73–81. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-2-73-81

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 24.01.2020; принята к публикации после рецензирования 28.02.2020; опубликована онлайн 29.04.2020



Receiving Device of a Precision Pulsed Laser Range Finder

Vladimir A. Golovkov✉, Nina I. Potapova, Petr N. Rudenko,
Boris G. Stradov, Stanislav V. Teliatnikov

JSC "Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering",
Sosnovy Bor, Russia

✉ golovkov_ggg@mail.ru

Abstract

Introduction. At present the most accurate estimate of ranges is specific to laser range finders using phase measuring techniques. Design of a pulsed laser range finder with short probe pulses enabling one to gain high resolution and accuracy of estimate of target range close to the phase range finders is the topical problem.

Aim. Development of a receiving part of the pulsed laser rangefinder with precision characteristics; determination of the accuracy of the measurements; description of the hardware.

Materials and methods. The construction of the receiving part of the precision pulsed laser rangefinder with a two-scale digital range estimation system implemented by counting clock generator pulses and an analog integrator that specifies the discrete range estimation was considered. Using the methods of mathematical statistics, the energy characteristics of the rangefinder were determined: the accuracy of the range estimation and the probability of false alarm were provided by the developed scheme. The hardware of the precision laser rangefinder was described.

Results. The principles of implementation of the receiving part of the laser rangefinder with a two-scale digital system for estimating the distance to the object were given. The results of numerical simulation of rangefinder characteristics were obtained, confirming the accuracy of range estimation of the order of millimeters. In the implemented rangefinder scheme, the probability of false alarm was 10^{-4} during 200 s of observing signal and noise mixture. The hardware of the precision laser rangefinder with a digital two-scale range estimation was proposed.

Conclusion. The implemented laser range finder approaches to the capabilities of phase laser rangefinders in terms of potential accuracy of distance up to millimeters, while implementing the specified parameter in rapidly changing phono-target environment. Using of short probing pulses with a duration of 10...20 ns allows one to achieve a resolution of up to 1.5 m. In contrast to the phase rangefinder the range can be estimated from a single probe pulse.

Keywords: range finder, avalanche photodiodes, infrared range, lens, probing pulse, signal-to-noise ratio, threshold level, rough and accurate range scale

For citation: Golovkov V. A., Potapova N. I., Rudenko P. N., Stradov B. G., Teliatnikov S. V. Receiving Device of a Precision Pulsed Laser Range Finder. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 2, pp. 73–81. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-2-73-81

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 24.01.2020; accepted 28.02.2020; published online 29.04.2020

Введение. В настоящее время наибольшей точностью оценки дальности обладают лазерные дальнометры, использующие фазовые методы измерения, для которых этот параметр составляет единицы миллиметров. Например, известны геодезические лазерные дальнометры, или лазерные рулетки, измеряющие расстояние до объекта с точностью до 1 мм [1]. В таких устройствах результат измерения дальности формируется на основании

оценки разности фаз амплитудно-модулированных зондирующего и отраженного оптических сигналов, поэтому фазовые методы пригодны для оценки дальности лишь до малоподвижных объектов и не могут работать в условиях быстро меняющейся фоновой обстановки.

Актуальной задачей является построение импульсных лазерных дальнометров (ИЛД), использующих короткие зондирующие импульсы, поз-

воляющих добиться высокой точности оценки дальности до объекта, приближающихся по точности к фазовым дальномерам. В таких устройствах могут использоваться созданные в настоящее время лазерные источники излучения с длительностью зондирующих импульсов в единицы наносекунд [2]. Поэтому актуальной задачей является разработка и анализ приемного узла прецизионного импульсного лазерного дальномера.

Цель работы. Разработка приемной части ИЛД с прецизионными характеристиками; определение точности его измерений; описание его аппаратного обеспечения.

Материалы и методы. В качестве фотоприемных устройств (ФПУ) [3] в ИЛД с высокой разрешающей способностью и чувствительностью целесообразно использовать лавинные фотодиоды с наличием, при необходимости, после них встроенных гибридных операционных усилителей и цифровой обработкой принимаемых выходных сигналов ФПУ. Из доступных отечественных ФПУ на базе германиевых лавинных фотодиодов можно упомянуть лавинные фотодиоды, например ЛФДГ-70, ЛФДГ-150, ФПУ-35. Некоторые из них, например ФПУ типа ЛФДГ, предназначены для работы в волоконно-оптических линиях связи, но могут быть использованы и при построении импульсных лазерных дальномеров. Чувствительность отечественных лавинных фотодиодов составляет приблизительно 25...35 А/Вт.

Из зарубежных ФПУ высокие параметры при приеме сигналов обеспечивают, например, ФПУ С30659-1060-3А с гибридным предусилителем, а также ФПУ фирмы "Hamamatsu" S11519-10. ФПУ С30659-1060-3А имеет чувствительность 450 кВ/Вт на длине волны 900 нм.

Рабочая длина волны лазерных дальномеров $\lambda = 1.06$ мкм определяется рабочей длиной волны серийно производимых и широко применяемых лазеров. Это, например, лазеры, в которых в качестве активного элемента используется алюмоиттриевый гранат, легированный ионами неодима.

Время отклика лавинных фотодиодов составляет менее 2 нс, что позволяет осуществлять оценку дальности до неоднородностей атмосферы или объектов с высокой точностью.

Для измерения расстояния до объекта с высоким разрешением длительность зондирующего импульса выбирается не превосходящей 20 нс. Необходимо отметить, что лавинные фотодиоды способны принимать импульсы указанных длительности и длины волны.

Лазерный импульс длительностью 20 нс имеет в пространстве вдоль оси распространения протяженность около 6 м. Это приводит к так называемому нестационарному облучению неоднородности атмосферы или другого объекта [4], имеющего радиальные размеры в несколько десятков метров. В этом случае длительность отраженного от объекта импульса увеличивается, а его форма становится неизвестной. Малогабаритные беспилотные летательные аппараты, напротив, в большинстве случаев могут рассматриваться как точечные объекты. В этих условиях временное положение принимаемых отраженных импульсов отсчитывается от их переднего фронта, в отличие от радиолокации, где оно оценивается по максимуму сигнала на выходе согласованного фильтра или по координате центра тяжести принимаемого сигнала. Расстояние до цели измеряется цифровым способом, путем подсчета импульсов высокостабильных тактовых кварцевых генераторов, укладываемых в интервале от переднего фронта зондирующего импульса до переднего фронта принятого импульса, отраженного от объекта. При этом одной из проблем является необходимость создания высокостабильного тактового генератора и счетчика импульсов высокой частоты. В настоящее время можно использовать ультрапрецизионные термостатированные кварцевые генераторы фирмы "Морион", диапазон частот которых до 100 МГц, например ГК200ТС [5]. Использовать более высокие тактовые частоты, на наш взгляд, нецелесообразно, поскольку указанное значение является верхним пределом работоспособности интегральных микросхем типа КМОП или ТТЛ. Более высокие тактовые частоты потребуют использования ЭСЛ-логики, согласования уровней сигнала и напряжения питания.

При подсчете количества импульсов тактового генератора, размещающихся между зондирующим импульсом лазера и отраженным от объекта импульсом, младшие разряды кода могут формироваться микросхемами двоичных счетчиков серии КМОП или ТТЛ. Старшие разряды кода дальности в этом случае могут формироваться в микроконтроллере или ПЛИС. При обнаружении отраженного импульса счет прекращается и младшие разряды двоичных счетчиков через интерфейс микропроцессора считываются в контроллер. Тактовая частота 100 МГц ограничивает точность измерения дальности за счет шума дискретизации.

Для увеличения точности следует прибегать к другим способам или использовать вторую, точную шкалу измерения дальности.

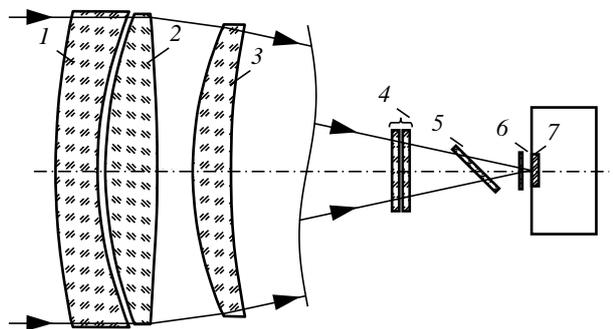
В АО "Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения" разработано и реализовано приемное устройство прецизионного ИЛД для использования в атмосфере на высотах выше 10 000 м. ИЛД рассчитан на измерение расстояния на дистанциях до $R_d = 200$ км до целей с эффективной площадью рассеяния (ЭПР) $S_{ц} = 0.1 \text{ м}^2$. Указанная дистанция до объектов характерна для работы дальномера в высоких слоях атмосферы, где можно не учитывать влияние атмосферной рефракции излучения.

Приемное устройство лазерного дальномера рассчитано на работу с лазером со следующими параметрами:

- длительность оптического импульса $\tau_{и} = 20 \text{ нс}$;
- энергия зондирующего импульса $E = 0.5 \text{ Дж}$;
- угол расходимости лазерного луча (половинный) $\nu = 4.8 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$;
- коэффициент пропускания системы излучателя $\rho_1 = 0.8$.

На рисунке приведена оптическая схема приемного устройства дальномера. Объектив, обеспечивающий прием отраженного от объекта лазерного излучения, состоит из линз 1, 2, 3 и характеризуется следующими параметрами:

- диаметр входной апертуры объектива $D = 0.25 \text{ м}$;



Оптическая схема приемного канала лазерного дальномера: 1, 2, 3 – линзы объектива; 4 – клинья блока юстировки; 5 – светоделительная пластина; 6 – оптический фильтр; 7 – лавинный фотодиод

The optical scheme of the receiving channel of the laser rangefinder: 1, 2, 3 – objective lenses; 4 – wedges of the alignment unit; 5 – beam splitter plate; 6 – optical filter; 7 – avalanche photodiode

- коэффициент пропускания объектива $\rho_2 = 0.8$.

Диаметр входной апертуры разработанного для дальномера объектива обеспечивает измерения на больших дальностях при имеющейся чувствительности ФПУ и энергии зондирующего лазерного излучения. Разработка объектива основана на принципе композиции оптических систем [6], примененном авторами настоящей статьи для оптических систем видимого и ближнего инфракрасного диапазонов [7, 8]. Поле зрения объектива составляет $16.5'$. Относительное отверстие объектива 1:2.5. Рабочие длины волн объектива $\lambda = 1.06$ и 0.67 мкм . Клинья блока юстировки 4 используются для юстировки оптической системы. Часть излучения с длиной волны 0.67 мкм , отводимая светоделительной пластиной 5, используется для работы контрольно-юстировочной аппаратуры. Излучение с длиной волны 1.06 мкм , пропущенное пластиной 5, поступает на фотоприемник 7, размещенный в фокальной плоскости объектива и принимающий сигнал, отраженный от объекта. Перед фотоприемником устанавливается оптический фильтр 6, отсекающий видимую область спектра, а также служащий для уменьшения фоновой засветки.

Для реализации приемного устройства лазерного дальномера с перечисленными ранее характеристиками в качестве ФПУ был использован лавинный фотодиод С30659-1060-3А со следующими параметрами [9]:

- выходное спектральное напряжение $S_n = 25 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$;
- энергетическая полоса пропускания ФПУ $\Delta f = 50 \text{ МГц}$;
- энергетическая чувствительность для излучения с длиной волны $\lambda = 1.06 \text{ мкм}$ $S_p = 280 \text{ кВ/Вт}$;
- выходное сопротивление $R = 50 \text{ Ом}$.

Будем считать, что форма зондирующего импульса близка к гауссовской (колоколообразной) и описывается как

$$S(t) = A \exp\left(-\pi t^2 / \tau_{и}^2\right),$$

где A – амплитуда; $\tau_{и}$ – длительность сигнала на уровне 0.46 [4]. Это близко к реальным характеристикам излучателя, к тому же позволяет упростить расчеты. Спектральная плотность такого импульса:

$$F(j\omega) = A\tau_{\text{и}} \exp\left(\frac{\omega^2 \tau_{\text{и}}^2}{2\pi}\right).$$

Тогда, учитывая равенство [10]

$$F(j\omega) = \sqrt{\pi/\alpha} \exp\left(\frac{\omega^2}{4\alpha}\right),$$

получим энергетическую ширину полосы фильтра:

$$\Delta f_{\text{э}} = \sqrt{\alpha/\pi} = 1/\tau_{\text{и}}, \quad (1)$$

где $\alpha = \pi/\tau_{\text{и}}^2$. Далее, используя [10], получим нормированную корреляционную функцию шума на выходе согласованного фильтра $\rho(\tau) = \exp(-\alpha\tau_{\text{и}}^2)$. Из (1) следует, что выбранное ФПУ согласовано с длительностью сигнала. Вторая производная корреляционной функции шума в нулевой точке, характеризующая второй центральный момент спектральной плотности шума, определяется как $-\rho''(0) = 2\alpha$.

Мощность принимаемого отраженного от объекта сигнала ($P_{\text{пр}}$) можно рассчитать при условии наблюдения удаленного объекта, когда вся его поверхность засвечена, а объект является изотропным отражателем. Используя [11] и учитывая потери оптического излучения в атмосфере:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{изл}}\rho_1\rho_2 D^2 S_{\text{ц}} \exp(-2kR_{\text{д}})}{4\pi v^2 R_{\text{д}}^4}, \quad (2)$$

где $P_{\text{изл}}$ – импульсная мощность лазера; k – спектральный коэффициент ослабления атмосферы. На высоте 10 000 м при длине волны $\lambda = 1.06$ мкм можно принять $k = 2.72 \cdot 10^{-4}$ в условиях тропиков и средних широт без учета аэрозольного рассеяния излучения [12]. Отношение сигнал/шум на выходе ФПУ $Q = 10$ считается типичным рабочим для лазерных дальномеров [13].

Расчет ЭПР объекта измерения можно произвести по методике численного моделирования диффузно отражающих объектов сложной формы [14]. Окончательно из (2) получим $P_{\text{пр}} \approx 3$ Вт.

Тогда энергия принимаемого на входе фотоприемника сигнала $E = P_{\text{пр}}\tau_{\text{и}} \approx 7 \cdot 10^{-16}$ Дж. Напряжение на выходе ФПУ при наличии сигнала $U_{\text{с}} = P_{\text{пр}}S_{\text{р}} = 1.1 \cdot 10^{-2}$ В, мощность шума на выходе ФПУ $P_{\text{ш}} = S_{\text{н}}^2 \Delta f = 1.1 \cdot 10^{-2}$ Вт. Действующее

напряжение шума на выходе ФПУ $U_{\text{ш}} = \sqrt{P_{\text{ш}}R} = 1.2 \cdot 10^{-3}$ В. Отсюда отношение сигнал/шум на выходе ФПУ $Q = U_{\text{с}}/U_{\text{ш}} = 10$.

Таким образом, отношение сигнал/шум на выходе ФПУ при принятой достаточно большой дистанции соответствует рабочему отношению для лазерных дальномеров. Полученная оценка справедлива только для больших высот, на которых происходят оптико-электронные астрофизические наблюдения на больших дистанциях [15]. При работе таких систем на больших дистанциях в атмосфере будет влиять рефракция оптического луча [16]. С уменьшением высоты начнет проявляться эффект турбулентности атмосферы, для лазерных дальномеров рассмотренный, например, в [17].

При анализе приемного блока необходимо рассчитать пороговый уровень на выходе ФПУ, превышение которого приводит к фиксации поступления сигнала, так как обнаружение сигнала осуществляется по общепринятому критерию Неймана–Пирсона [4]. Напряжение с выхода усилителя подается на компаратор. При превышении порогового уровня фиксируются обнаружение сигнала и оцениваются его параметры.

Считая, что на выходе ФПУ шум нормализован, используя теорию выбросов случайных процессов, получим среднее число пересечений порогового уровня H с положительной производной в отсутствие входного излучения [4]:

$$N(H) = \frac{T_{\text{н}}}{2\pi} \sqrt{-\rho''(0)} \exp\left(\frac{H^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

где $T_{\text{н}}$ – время наблюдения; σ^2 – дисперсия помехи.

В приемной части дальномера реализована схема типа "следающий порог". Для этого на выходе ФПУ установлен фильтр нижних частот (ФНЧ) с диодом, отсекающим напряжение отрицательной полярности. В этом случае среднее значение напряжения на выходе ФНЧ составляет $U = 0.4\sigma$ [18]. Для достижения вероятности ложной тревоги $P_{\text{л.т}} \leq 10^{-4}$ за время наблюдения $T_{\text{н}} = 200$ с на выходе ФНЧ включен операционный усилитель с коэффициентом усиления $K \approx 20$.

Введем значение порога, нормированное на среднеквадратическое отклонение (СКО) шума $\mu_0 = H/\sigma$ [4]. Из (3) получим:

$$\mu_0 = 2 \ln \left[\frac{\sqrt{-\rho''(0)} T_{\text{н}}}{2\pi P_{\text{л.т}}} \right].$$

Для $P_{д.т} = 10^{-4}$ получим $\mu_0 = 7.9$. Если коэффициент усиления операционного усилителя понизить до $K \approx 17$, то в среднем ложная тревога и вызванная этим неправильная оценка дальности будут происходить один раз за 200 с.

Для измерения дальности в предложенной схеме дальномера используется двухшкальная, грубая и точная, система измерения. Грубое измерение дальности осуществляется с использованием генератора NT3631A, формирующего импульсы с тактовой частотой 16 МГц (период $T_0 = 62.5$ нс). Отклонение частоты генератора при нестабильности напряжения питания $\pm 5\%$ не превосходит ± 0.3 Гц. Таким образом, частота генератора изменяется в пределах $16 \pm 0.3 \cdot 10^{-6}$ МГц, а период частоты (T_0) может изменяться от 62.499998 до 62.500002 с. Отсюда максимальная разница в периодах частот за счет возможной нестабильности составит $\Delta T = \pm 0.2 \cdot 10^{-5}$ нс. Нетрудно показать, что при максимальном удалении объекта порядка нескольких сотен километров наибольшая ошибка в оценке дальности при условии долговременного ухода частоты тактового генератора составит не более нескольких миллиметров. Таким образом, нестабильность частоты тактового генератора практически не должна сказываться на результате измерения.

Определим дискретность измерения расстояния при приеме отраженного импульса за счет грубой шкалы: $\Delta R = (T_0/2)c = 9.4$ м, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

Дисперсия оценки времени, проводимой по грубой шкале, с учетом равномерной плотности вероятности времени прихода отраженного импульса определяется выражением [19]

$$\sigma_t^2 = 2(T_0^2/12) = 0.65 \cdot 10^{-15} \text{ с}^2. \quad (4)$$

Коэффициент 2 в (4) введен для учета измерения временного положения зондирующего импульса аналогично измерению положения отраженного импульса. СКО оценки времени составит $\sigma_t = 0.25 \cdot 10^{-7}$ с. Тогда дисперсия оценки дальности грубой шкалой составит

$$\sigma_R^2 = (c^2/4)\sigma_t^2 = 14.6 \text{ м}^2.$$

СКО измерения дальности по грубой шкале составит $\sigma_R = 3.8$ м. Вторая, точная, шкала осно-

вана на измерении заряда прецизионного конденсатора в промежутке между импульсами грубой шкалы. Накопленное напряжение лежит в пределах от 0 до 3 В. При приходе отраженного импульса заряд конденсатора прекращается и накопленное на нем напряжение измеряется. Точность измерения определяется 12-разрядным прецизионным однополярным аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Таким образом, шкала имеет $n = 4096$ уровней. За счет дискретности АЦП дистанция между его соседними уровнями составляет $\Delta R_0 = \Delta R/n = 2.3$ мм.

Дисперсия оценки измерения дальности по точной шкале с учетом равномерной плотности вероятности времени прихода отраженного импульса между уровнями АЦП составит:

$$\sigma_{R_0}^2 = 2(\Delta R_0^2/12) = 0.88 \text{ мм}^2. \quad (5)$$

Коэффициент 2 в (5) имеет тот же смысл, что и для (4). СКО оценки дистанции точной шкалы $\sigma_{R_0} = 0.94$ мм. Таким образом, погрешности, выражаемые ошибками при измерении дистанции до объекта с заданным ЭПР и вносимые шумом ФПУ, шумом дискретизации, шумом, вызванным нестабильностью генератора тактовой частоты, очень малы. Основная ошибка будет аппаратной и состоять в нестабильности оценки времени пересечения порогового уровня смесью сигнала и шума.

Результаты. В настоящей статье представлены принципы реализации приемной части ИЛД с двухшкальной цифровой системой оценки дальности до объекта. Получены результаты численного моделирования характеристик дальномера, подтверждающие точность оценки дальности порядка миллиметров. Вероятность ложной тревоги, определяемая шумами ФПУ, в представленной схеме дальномера составляет 10^{-4} при наблюдении реализации смеси сигнала с шумом в течение 200 с. Аппаратное обеспечение реализованного прецизионного ИЛД базируется на использовании лавинного фотодиода и цифровой системы измерения дальности на основе подсчета тактовых импульсов прецизионного генератора и аналогового интегратора, уточняющего дискретную оценку дальности.

Заключение. Реализованный ИЛД по достигнутой точности оценки дальности до объекта порядка миллиметров приближается к потенциальным возможностям точных фазовых лазерных дальномеров, обеспечивая оценку дальности по

одному зондирующему импульсу в условиях быстро изменяющейся фоноцелевой обстановки. Разрешающая способность дальномера, определяемая длительностью зондирующего импульса, также будет высокой: до 1.5 м, при длительности зондирующего импульса 10 нс, в отличие от фазовых дальномеров, где требуется продолжительная

подсветка объекта модулированным по амплитуде лазерным излучением. Следует отметить, что на дальних дистанциях рефракция лазерного излучения в атмосфере скажется на его работоспособности, поэтому энергетический расчет дальномера проводился для больших высот, где эта помеха влияет незначительно.

Авторский вклад

Головков В. А. – энергетические расчеты дальномера.

Потапова Н. И. – разработка объектива дальномера и расчеты его параметров.

Руденко П. А., Страдов Б. Г., Телятников С. В. – разработка общих принципов построения приемной части прецизионного лазерного дальномера и его аппаратной части в равной мере.

Author's contribution

Vladimir A. Golovkov, energy calculations range finder.

Nina I. Potapova, development of a range finder lens and calculations of its parameters.

Petr N. Rudenko, Boris G. Stradov, Stanislav V. Teliatnikov, development of general principles for the construction of the receiving part of a precision laser range finder and its hardware.

Список литературы

1. Основы импульсной лазерной локации / В. И. Козинцев, М. Л. Белов, В. М. Орлов, В. А. Городничев, Б. В. Стрелков; под ред. В. Н. Рождественна. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 512 с.
2. Крюков П. Г. Лазеры ультракоротких импульсов // Квантовая электроника. 2001. Т. 31, № 2. С. 95–119.
3. Ишанин Г. Г., Челибанов В. П. Приемники оптического излучения / под ред. проф. В. В. Коротаева. СПб.: Лань, 2014. 304 с.
4. Лебедько Е. Г. Системы импульсной оптической локации. СПб.: Лань, 2014. 368 с.
5. Прецизионный кварцевый генератор ГК200-ТС. URL: <http://www.allcomponents.ru/html/morion/gk200ts.html> (дата обращения 31.03.2020)
6. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы "смотрящего" типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
7. Потапова Н. И. Объективы на основе базовых линз с асферическими поверхностями // Оптический журн. 2012. Т. 79, № 12. С. 41–45.
8. Потапова Н. И., Стариков А. Д., Цветков А. Д. Светосильный зеркально-линзовый объектив для инфракрасного диапазона // Оптический журн. 2003. Т. 70, № 4. С. 76–81.
9. C30659-1060-3A Datasheet. URL: <http://kazus.ru/datasheets/pdf-data/2560791/PERKINELMER/C30659-1060-3A.html> (дата обращения 31.03.2020)
10. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
11. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2004. 320 с.
12. Optical Properties of the Atmosphere / R. A. McClachey, R. W. Fenn, J. E. A. Selby, J. S. Garing, F. E. Volz. Air Force Cambridge Research Laboratories. United States Air Force, 1970. Optical Physics Laboratory Project 7670.
13. Балашов И. Ф. Энергетическая оценка импульсных лазерных дальномеров. СПб.: ГИТМО (ТУ), 1999. 22 с.
14. Потапова Н. И. Методика расчета эффективной площади рассеяния диффузно отражающих объектов сложной формы // Оптический журн. 2014. Т. 81, № 9. С. 28–34.
15. Фомин В. Н., Никитин В. М., Коломийцев Е. Г. Оптико-электронные астрофизические наблюдения в условиях помех. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. 198 с.
16. Дементьев В. Е. Рефракция в турбулентной атмосфере. М.: Галлея-Принт, 2011. 398 с.
17. Effect of Atmospheric Turbulence on Laser Radar / C. Xiping, D. Li, L. Jianbo, L. Libao, Z. Kexiang // Third Intern. Asia-Pacific Environmental Remote Sensing Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space. Hangzhou, China, 23–27 oct. 2002, Proc. of SPIE. Vol. 4893. Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III. 2003. P. 362–367. <https://doi.org/10.1117/12.466082>
18. Мирский Г. Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. 2-е изд. М.: Энергия, 1972. 456 с.
19. Маркович И. И. Цифровая обработка сигналов в системах и устройствах. Ростов н/Д: Изд-во Южн. федерального ун-та, 2012. 234 с.

Информация об авторах

Головков Владимир Алексеевич – кандидат технических наук (1982), доцент (2009). Старший научный сотрудник АО "НИИ оптико-электронных приборов" (НИИ ОЭП) (Сосновый Бор, Россия). Автор 70 научных работ. Сфера научных интересов – обработка сигналов оптико-электронных устройств. Адрес: АО НИИ ОЭП, Ленинградский пр., Сосновый Бор, д. 29, 188541, Россия
E-mail: golovkov_ggg@mail.ru

Потапова Нина Ивановна – кандидат технических наук (1994). Начальник отдела – начальник лаборатории АО "НИИ оптико-электронных приборов" (НИИ ОЭП) (Сосновый Бор, Россия). Автор 56 научных работ. Сфера научных интересов – оптика и лазерная техника.

Адрес: АО НИИ ОЭП, Ленинградский пр., Сосновый Бор, д. 29, 188541, Россия

E-mail: potap@sbor.net

Руденко Петр Николаевич – дипломированный специалист по специальности "Оптические и оптико-электронные системы" (1988, Ленинградский институт точной механики и оптики). Начальник отдела АО "НИИ оптико-электронных приборов" (НИИ ОЭП) (Сосновый Бор, Россия). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка и испытания оптико-электронных приборов.

Адрес: АО НИИ ОЭП, Ленинградский пр., Сосновый Бор, д. 29, 188541, Россия

E-mail: rudenkopr@niioep.ru

Страдов Борис Георгиевич – дипломированный специалист по специальности "Оптические и оптико-электронные системы" (1990, Ленинградский институт точной механики и оптики). Начальник сектора АО "НИИ оптико-электронных приборов" (НИИ ОЭП) (Сосновый Бор, Россия). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка и испытания оптико-электронных приборов.

Адрес: АО НИИ ОЭП, Ленинградский пр., Сосновый Бор, д. 29, 188541, Россия

Телятников Станислав Викторович – дипломированный специалист по специальности "Промышленная и медицинская электроника" (1986, Томский политехнический институт). Ведущий инженер АО "НИИ оптико-электронных приборов" (НИИ ОЭП) (Сосновый Бор, Россия). Сфера научных интересов – разработка электронных приборов и систем для средств автоматизации и измерений.

Адрес: АО НИИ ОЭП, Ленинградский пр., Сосновый Бор, д. 29, 188541, Россия

E-mail: telyatnikovsv@niioep.ru

References

1. Kozintsev V. I., Belov M. L., Orlov V. M., Gorodnichenov V. A., Strelkov B. V. *Osnovy impul'snoi lazernoi lokatsii* [The basics of pulsed laser ranging], ed. by V. N. Rozhdestven. Moscow, *Izd-vo MGU im. N. E. Baubana*, 2016, 512 p. (In Russ.)
2. Kryukov P. G. Ultrashort-pulse lasers. *Quantum Electronics*. 2001, vol. 31, no. 2, pp. 95–119. doi: 10.1070/QE2001v031n02ABEH001906
3. Ishanin G. G., Chelibanov V. P. *Priemniki opticheskogo izlucheniya* [Optical Receivers], ed. by V. V. Korotaev. SPb, *Lan'*, 2014, 304 p. (In Russ.)
4. Lebed'ko E. G. *Sistemy impul'snoy opticheskoy lokatsii* [Pulse Optical Location Systems]. SPb, *Lan'*, 2014, 368 p. (In Russ.)
5. Precision Quartz Generator GK200-TS. Available at: <http://www.allcomponents.ru/html/morion/gk200ts.html> (accessed 31.03.2020)
6. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. *Infrakrasnye sistemy "smotryashchego" tipa* ["Looking" infrared systems]. Moscow, *Logos*, 2004, 444 p. (In Russ.)
7. Potapova N. I. Lenses Based on the Basic Lens with Aspheric Surfaces. *Journal of Optical Technology*. 2012, vol. 79, no. 12, pp. 41–45. (In Russ.)
8. Potapova N. I., Starikov A. D., Tsvetkov A. D. High-Aperture Infrared Mirror Lens. *Journal of Optical Technology*. 2003, vol. 70, no. 4, pp. 76–81. (In Russ.)
9. C30659-1060-3A Datasheet. Available at: <http://kazus.ru/datasheets/pdf-data/2560791/PERKI-NELMER/C30659-1060-3A.html> (accessed 31.03.2020)
10. Tikhonov V. I. *Statisticheskaya radiotekhnika* [Statistical Radio Engineering]. 2nd ed. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1982, 624 p. (In Russ.)
11. Bakulev P. A. *Radiolokatsionnye sistemy* [Radar Systems]. Moscow, *Radiotekhnika*, 2004, 320 p. (In Russ.)
12. McClachey R. A., Fenn R. W., Selby J. E. A., Garing J. S., Volz F. E. *Optical Properties of the Atmosphere*. Air Force Cambridge Research Laboratories. United States Air Force, 1970. Optical Physics Laboratory Project 7670.
13. Balashov I. F. *Energeticheskaya otsenka impul'snykh lazernykh dal'nomerov* [Energy estimation of pulsed laser rangefinders]. SPb, *GITMO (TU)*, 1999, 22 p. (In Russ.)
14. Potapova N. I. Method for Calculating the Effective Scattering Area of Diffusely Reflecting Objects of Complex Shape. *Journal of Optical Technology*. 2014, vol. 81, no. 9, pp. 28–34. (In Russ.)
15. Fomin V. N., Nikitin V. M., Kolomiitsev E. G. *Optiko-elektronnyye astrofizicheskie nablyudeniya v usloviyakh pomekh* [Optical-Electronic Astrophysical Observations under Interference Conditions]. Moscow, *Izd-vo MGU*, 2012, 198 p. (In Russ.)
16. Dement'ev V. E. *Refraktsiya v turbulentnoi atmosfere* [Refraction in a Turbulent Atmosphere]. Moscow, *Galleja-Print*, 2011, 398 p. (In Russ.)
17. Xiping C., Li D., Jianbo L., Libao L., Kexiang Z. Effect of Atmospheric Turbulence on Laser Radar. Third Intern. Asia-Pacific Environmental Remote Sensing Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space. 23–27 oct. 2002, Hangzhou, China. Proc. of SPIE. Vol. 4893. Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III. 2003, pp. 362–367. doi: 10.1117/12.466082
18. Mirskii G. Ya. *Apparaturnoe opredelenie kharakteristik sluchainykh protsessov* [Hardware Characterization of Random Processes]. 2nd ed. Moscow, *Energiya*, 1972, 456 p. (In Russ.)
19. Markovich I. I. *Tsifrovaya obrabotka signalov v sistemakh i ustroystvakh* [Digital Signal Processing in Systems and Devices]. Rostov-on-the-Don, *Izd-vo Yuzhn. federal'nogo un-ta*, 2012, 234 p. (In Russ.)

Information about the Authors

Vladimir A. Golovkov, Cand. Sci. (Eng.) (1982), Associate Professor (2009), Senior Researcher in JSC "Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering" (Sosnovy Bor). The author of 70 scientific publications. Area of expertise: signal processing of optoelectronic devices.

Address: JSC "Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering", 29 Leningradskaya Ave., Sosnovy Bor 188541, Russia

E-mail: golovkov_ggg@mail.ru

Nina I. Potapova, Cand. Sci. (Eng.) (1994). Head of Department - Head of Laboratory in JSC "Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering" (Sosnovy Bor). The author of 56 scientific publications. Area of expertise: optics and laser technology.

Address: JSC "Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering", 29 Leningradskaya Ave., Sosnovy Bor 188541, Russia

E-mail: potap@sbor.net

Petr N. Rudenko, Certified Specialist in "Optical and Optoelectronic Systems" (1988, ITMO University). Head of Department in JSC "Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering" (Sosnovy Bor). The author of 2 scientific publications. Area of expertise: development and testing of optoelectronic devices.

Address: JSC "Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering", 29 Leningradskaya Ave., Sosnovy Bor 188541, Russia

E-mail: rudenkopn@nioep.ru.

Boris G. Stradov, Certified Specialist in "Optical and Optoelectronic Systems" (1988, ITMO University). Head of Sector in JSC "Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering" (Sosnovy Bor). The author of 2 scientific publications. Area of expertise: development and testing of optoelectronic devices.

Address: JSC "Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering", 29 Leningradskaya Ave., Sosnovy Bor 188541, Russia

Stanislav V. Teliatnikov, Certified Specialist in Industrial and Medical Electronics (1986, Tomsk Polytechnic University). Lead Engineer in JSC "Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering" (Sosnovy Bor). Area of expertise: development of electronic devices and systems for automation and measurement tools.

Address: JSC "Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering", 29 Leningradskaya Ave., Sosnovy Bor 188541, Russia

E-mail: telyatnikovsv@nioep.ru
