
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

УДК 621.396.96
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-1-44-48

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКОГО ДАЛЬНОМЕРА ЗА СЧЕТ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

А. Б. АТНАШЕВ*, В. Г. ЦЫБРИН

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия,
atn2@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются оптические дальномеры на основе лазеров, в которых измерения осуществляются не по времени получения отраженного от объекта импульса, а путем свертки отраженного и опорного сигналов. По положению результирующего сигнала на временной оси определяются время прихода отраженных колебаний и дальность объекта. За счет оптимальной обработки получаемого сигнала повышается точность и быстродействие дальномера.

Ключевые слова: *дальномер, зондирующий сигнал, мультивибратор, быстродействие*

Ссылка для цитирования: *Атнашев А. Б., Цыбрин В. Г. Повышение точности и быстродействия оптического дальномера за счет корреляционной обработки сигнала // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 1. С. 44—48. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-1-44-48*

INCREASING THE ACCURACY AND SPEED OF THE OPTICAL RANGEFINDER DUE TO CORRELATION SIGNAL PROCESSING

A. B. Atnashev*, V. G. Tsybrin

*A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
atn2@mail.ru*

Abstract. Optical laser-based rangefinders are considered, in which measurements are carried out not by the time of arrival of the pulse reflected from the object, but by convolution of the reflected and reference signals. The position of the resulting signal on the time axis determines the time of arrival of the reflected oscillations and the object distance. Due to the optimal processing of the received signal, the accuracy and the rangefinder performance increase.

Keywords: *rangefinder, sounding signal, multivibrator, performance*

For citation: *Atnashev A. B., Tsybrin V. G. Increasing the accuracy and speed of the optical rangefinder due to correlation signal processing. Journal of Instrument Engineering. 2021. Vol. 65, N 1. P. 44—48 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-1-44-48.*

Лазерная дальнометрия является одной из первых областей практического применения лазеров в зарубежной военной технике. Первые опыты относятся к 1961 г. В настоящее время лазерные дальномеры используются в наземной технике (в артиллерии, танковых войсках), в авиации (высотомеры, целеуказатели) и на флоте.

Цель настоящей статьи — исследование процесса корреляционной обработки сигнала, полученного путем преобразования оптических колебаний, отраженных от объекта при лазерном измерении дальности.

© Атнашев А. Б., Цыбрин В. Г., 2022

Как правило, задача определения расстояния между измерителем и объектом сводится к измерению соответствующего интервала времени между зондирующим сигналом и сигналом, отраженным от цели. Существуют три метода измерения дальности в зависимости от того, какой характер модуляции лазерного излучения используется — импульсный, фазовый или фазоимпульсный.

Первый из указанных методов, используемый наиболее часто, основан на измерении интервала времени, необходимого для прохождения импульса излучения до объекта и обратно и оцениваемого по количеству калиброванных импульсов. Погрешность в данном случае определяется по точности измерения данного временного интервала.

Методы измерения дальности с использованием как первого, так и других вариантов исследования, например фазового, многократно апробированы и достигнуты определенные значения, для преодоления которых требуются иные, отличные от известных, подходы. Вместе с тем повышение точности измерения дальности и улучшение быстродействия остается актуальной задачей.

Схема, используемая при построении импульсных оптических дальномеров, основана на измерении интервала времени, соответствующего минимальной измеряемой дистанции, значительно превышающей длительность сигнала на выходе приемно-усилительного тракта. В этой схеме как излучаемый сигнал, так и принимаемый импульс обрабатываются в одном приемном канале. При этом часть энергии в момент излучения отводится посредством светопровода на фотоприемник приемно-усилительного тракта.

Известны несколько методов фиксации временного положения сигнала — по фронту, фронту и спаду импульса, по максимуму импульса, а также фиксация со сдвигом импульса.

Наиболее распространенным является метод фиксации по фронту импульса, в котором в качестве решающего устройства применяются пороговые схемы типа триггера Шмидта, ждущего мультивибратора и др. Однако метод фиксации по фронту импульса дает большую принципиальную погрешность, обусловленную смещением отсчетной точки под действием флуктуационных шумов. При этом также может возникать динамическая погрешность, вызванная смещением точки отсчета вследствие изменения интенсивности принимаемого сигнала. Динамическую ошибку позволяет исключить фиксация импульса по фронту и спаду, однако принципиальная погрешность в этом случае будет больше, чем при фиксации по фронту даже с учетом корреляции процессов на спаде и фронте. В большинстве подобных измерений [1] используется следующее выражение для определения погрешности временного интервала:

$$\Delta T = \pm T_{\text{сл}}/n, \quad (1)$$

где $T_{\text{сл}}$ — период следования импульсов в последовательности, n — количество импульсов.

При использовании полупроводниковых лазеров, имеющих меньшую мощность по сравнению с твердотельными, применяется принцип накопления сигнала при приеме отраженных колебаний. В случае статистического некогерентного накопления эквивалентная энергия сигнала увеличивается в \sqrt{N} раз, где N — число зондирований в серии [2]. Также увеличивается время измерения.

Очевидной задачей является повышение точности измерения дистанции до объекта и сокращение времени измерения.

Особенность используемого оптического сигнала — это высокая частота излучения. По этой причине невозможно непосредственное преобразование принятого сигнала в электрический, с помощью которого можно было бы осуществить обработку полученной последовательности различными способами.

Получаемый с фотоприемника сигнал представляет собой синусоидальные колебания, модулированные по амплитуде. При этом преобразование сигнала эквивалентно выпрямлению

на диодном устройстве. Напряжение, снимаемое с фотоприемника, не содержит высокочастотную составляющую и представляет группу, чаще всего, прямоугольных импульсов одной полярности.

Для передаваемого импульса задача фиксации решается достаточно легко, поскольку сигнал характеризуется амплитудой и временной стабильностью. Решить же аналогичную задачу для импульса, принимаемого от цели, значительно сложнее. В зависимости от дальности, состояния локационной трассы и типа цели амплитуда сигнала может изменяться на 4—6 порядков. При этом существенно изменяется форма сигнала из-за его ограничения в приемном тракте. Кроме того, сигнал может искажаться шумами и помехами аддитивного и мультипликативного характера.

Наиболее распространен метод временной привязки сигнала путем фиксации его по уровню, когда момент фиксации определяется моментом пересечения сигналом порога срабатывания формирователя. Очевидно, что положение сигнала нестабильно, так как зависит от амплитуды импульса. Максимальный разброс момента фиксации равен длительности фронта импульса. Способы устранения нестабильности сложны и используются редко.

При известных параметрах сигнала [2] задержка фиксации пересечения нуля относительно точки максимума сигнала в линейной зоне равна 5 нс (0,7 м), а при максимальной перегрузке — 35 нс (3,3 м). Таким образом, нестабильность фиксации эквивалентна ошибке 2,6 м, что лишает этот метод преимуществ относительно метода фиксации по уровню сигнала.

Важно, что накопление сигнала дает не только энергетический выигрыш, но и повышает точность измерений. Поэтому желательно устанавливать длительность зондирующего импульса в несколько раз (5—10) превышающую длительность дискретизации измерителя временных интервалов, при этом точность остается прежней, а энергетический потенциал прибора возрастает. Следует отметить, что это достигается за счет увеличения длительности зондирующего импульса, т.е. увеличивается время измерения.

Наряду со спектральным подходом к описанию сигналов на практике оказывается необходимой частотная характеристика, которая позволяет дать представление о некоторых свойствах сигнала, в частности о скорости изменения во времени без разложения его на гармонические составляющие.

В качестве такой временной характеристики используется автокорреляционная функция сигнала. Для детерминированного сигнала $s(t)$ конечной длительности автокорреляционная функция определяется следующим выражением:

$$\varphi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s(t - \tau) dt, \quad (2)$$

где τ — временной сдвиг сигнала.

Функция достигает максимума при $\tau = 0$, так как любой сигнал полностью коррелирован с самим собой. При этом

$$\varphi(0) = \int_{-\infty}^{\infty} s^2 dt = E,$$

т.е. максимальное значение автокорреляционной функции равно энергии сигнала E .

Для оценки степени связи между двумя различными сигналами $s_1(t)$ и $s_2(t)$ используется взаимная корреляционная функция (ВКФ), которая определяется выражением, аналогичным предыдущему:

$$\varphi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) s_2(t - \tau) dt = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t + \tau) s_2(t) dt. \quad (3)$$

При этом относительно точности дальномера возникает иная ситуация, если отраженный от объекта сигнал обрабатывается путем вычисления в соответствии с выражением (3) корреляционной функции принятых колебаний. Непосредственного суммирования импульсов при такой обработке не происходит. Сигнал, эквивалентный суммарному, формируется в результате компьютерной реализации алгоритма (3). В данном случае взаимная корреляционная функция, как показано в [3], представляет собой нормированную функцию вида

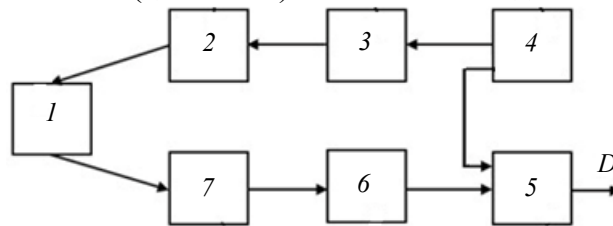
$$|\Psi_0(t, 0)| \approx |\sin \pi f t / \pi f| \quad (4)$$

с центральным максимумом шириной $\Delta t = 2 / \Delta f$ (по нулевому уровню), который определяется только девиацией частоты. Функция (4) пересекает уровень 0,5 в точках $t_{1,2} = \pm 0,6 / \Delta f$, которые определяют ширину области высокой корреляции и тем самым разрешающую способность по времени

$$\Delta t = 1,2 / \Delta f . \quad (5)$$

Как показывают расчеты, при полосе пропускания $\Delta f = 100$ МГц ошибка по времени согласно (5) составляет $\Delta t = 1,2 \cdot 10^{-9}$ с, что соответствует погрешности измерения дальности до 0,36 м.

Упрощенная функциональная схема устройства приведена на рисунке, где 1 — исследуемый отражающий объект, 2 — излучатель, 3 — формирователь излучаемого сигнала, 4 — компьютер, 5 — вычислитель корреляционной функции, 6 — приемно-усилительный тракт, 7 — фотоприемник; символом D (дальность) обозначен выходной сигнал дальномера.



В качестве излучателя 2, как правило, используются лазеры (твердотельные, полупроводниковые); фотоприемник 7 выбирают с высоким быстродействием, для его изготовления могут быть использованы материалы, содержащие соединения ртути, например HgCdTe.

Работа устройства аналогична работе дальномера, основанного на измерении временного интервала [1]. Существенно отличается обработка принятого сигнала. К отражающему объекту 1 посредством излучателя 2 посылается кодирующий сигнал, получаемый с помощью формирователя 3 в виде последовательности неэквилидистантных импульсов. Принятый фотоприемником 7 отраженный от объекта 1 сигнал, проходя тракт 6, преобразуется, усиливается и подается на вход вычислителя 5 корреляционной функции. На другой вход вычислителя 5 подается опорный радиосигнал, запоминаемый компьютером 4 при излучении зондирующего сигнала. С использованием компьютера вычисляется ВКФ указанных сигналов. По превышению амплитуды импульса над уровнем шума, полученного при вычислении ВКФ, судят о наличии объекта, а по положению импульса на временной оси графика ВКФ определяют расстояние до объекта.

Как следует из приведенного примера, точность дальномера может достигать величины, сравнимой с долей 0,5 м. При этом для повышения точности не нужно увеличивать длительность сигнала, т.е. изменять время измерения.

При больших радиальных скоростях движения объекта может потребоваться компенсация доплеровского смещения частоты получаемого сигнала, что реализуется по методу, рассмотренному в [4].

Таким образом, при использовании оптического дальномера на основе лазеров повышение его точности и быстродействия достигается за счет оптимальной обработки принятых импульсов.

Преобразование оптического сигнала в электрический с последующей оптимальной обработкой указанного сигнала позволяет существенно улучшить характеристики дальномера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедько Е. Г. Системы оптической локации. Ч. 3: Учеб. пособие для вузов. СПб: НИУ ИТМО, 2013. С. 25—29.
2. Вильнер В., Ларюшкин А., Рудь Е. Методы повышения точности импульсных лазерных дальнометров // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. № 3. С. 118—123.
3. Лезин Ю. С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем. М.: Радио и связь, 1986. 280 с.
4. Атнашев А. Б., Цыбрин В. Г. Мультипликативная обработка частотного спектра излучения подвижного объекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 3. С. 208—212.

Сведения об авторах

- Анатолий Борисович Атнашев** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского; ст. научный сотрудник; E-mail: atn2@mail.ru
- Владимир Григорьевич Цыбрин** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского; преподаватель; E-mail: vladgrigor@mail.ru

Поступила в редакцию 04.06.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021; принята к публикации 02.12.2021.

REFERENCES

1. Lebedko E.G. *Sistemy opticheskoy lokatsii, chast' 3* (Optical Locating Systems, Part 3), St. Petersburg, 2013, pp. 25–29. (in Russ.)
2. Vilner V., Laryushkin A., Rud E. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, 2008, no. 3, pp. 118–123. (in Russ.)
3. Lezin Yu.S. *Vvedeniye v teoriyu i tekhniku radiotekhnicheskikh sistem* (Introduction to the Theory and Technology of Radio Engineering Systems), Moscow, 1986, 280 p. (in Russ.)
4. Atnashev A.B., Tsybrin V.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 3(64), pp. 208–212. (in Russ.)

Data on authors

- Anatoly B. Atnashev** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy; Senior Scientist; E-mail: atn2@mail.ru
- Vladimir G. Tsybrin** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy; Lecturer; E-mail: vladgrigor@mail.ru

Received 04.06.2021; approved after reviewing 14.09.2021; accepted for publication 02.12.2021.