



УДК 535:631.373.826

ИЗМЕРЕНИЕ НАКЛОННОЙ ДАЛЬНОСТИ ЛАЗЕРНЫМИ ДАЛЬНОМЕРАМИ

Ле Дин Ву^а, Е.Г. Лебедько^а^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: Ldву81@rambler.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 29.05.17, принята к печати 30.06.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-605-611

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Ле Дин Ву, Лебедько Е.Г. Измерение наклонной дальности лазерными дальномерами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 4. С. 605–611. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-605-611

Аннотация

Рассмотрена проблема определения наклонной дальности с летательных аппаратов в условиях сложной пространственной структуры. Определение дальности в активных лазерных дальномерам основано на измерении времени запаздывания между моментами фиксации излучения и принимаемого сигнала, отраженного от цели. Сигнальный выброс от цели является элементом случайного процесса вследствие протяженности облучаемой поверхности даже при узких полях излучения. Определение наклонной дальности до цели с летательных аппаратов требует идентификации сигнального выброса от цели на фоне сигнальных выбросов от подстилающей поверхности. Предложены два метода измерения наклонной дальности, обеспечивающие задачу идентификации цели в условиях сложной пространственной структуры подстилающей поверхности. Первый метод основан на измерении наклонной дальности при совмещении нижнего края поля излучения с линией визирования. Вторым методом основан на измерении наклонной дальности при совмещении верхнего края поля излучения с линией визирования. Предложены структурные схемы, реализующие эти методы. Приведено описание принципа работы схем. Дана оценка преимуществ и недостатков предлагаемых решений.

Ключевые слова

измерение наклонной дальности, отражательные импульсные характеристики, импульсный лазерный дальномер, подстилающая поверхность, угол поля излучения

SLANT RANGE MEASUREMENT BY IMPULSE LASER RANGE FINDER

Le Dinh Vu^а, E.G. Lebedko^а^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Ldву81@rambler.ru

Article info

Received 29.05.17, accepted 30.06.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-605-611

Article in Russian

For citation: Le Dinh Vu, Lebedko E.G. Slant range measurement by impulse laser range finder. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 605–611 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-605-611

Abstract

We consider the problem of slant range distance measurement from aircrafts in conditions of complex spatial structure. The range determination in active laser range finders, including slant range, is based on measuring the time difference of two time points, the time point when the pulse exits the laser range finders, and the time point when the pulse comes back, after being reflected from a target. The signal emission reflected from a target is a variable of random process, because of the irradiated surface length, even under narrow field radiation. When determining the slant range distance from aircraft to a target, it is necessary to identify the signal emission reflected from a target, from background signal reflected by underlying surface. We propose two methods of slant range measurements, provided identification of target that is located on the underlying surface with complex structure. The first method is based on the measurement of slant range distance when the lower edge of the radiation field is aligned with the pointing direction. The second method is based on the measurement of slant range distance when the upper edge of the radiation field is aligned with the pointing direction. We propose structural schemes based on these methods and describe their operation principles. Evaluation of the advantages and disadvantages for each method is given.

Keywords

slant range measurement, reflective impulse characteristics, pulsed laser range finder, underlying surface, beam divergence angle

Введение

Измерению дальности современными лазерными дальномерами, их построению, пороговой чувствительности и погрешностям измерения посвящено к настоящему времени большое количество публикаций, в частности, работы [1–9]. Измерение наклонной дальности рассматривается, главным образом, при использовании лазерных рулеток в строительном деле при измерении малых дистанций [5].

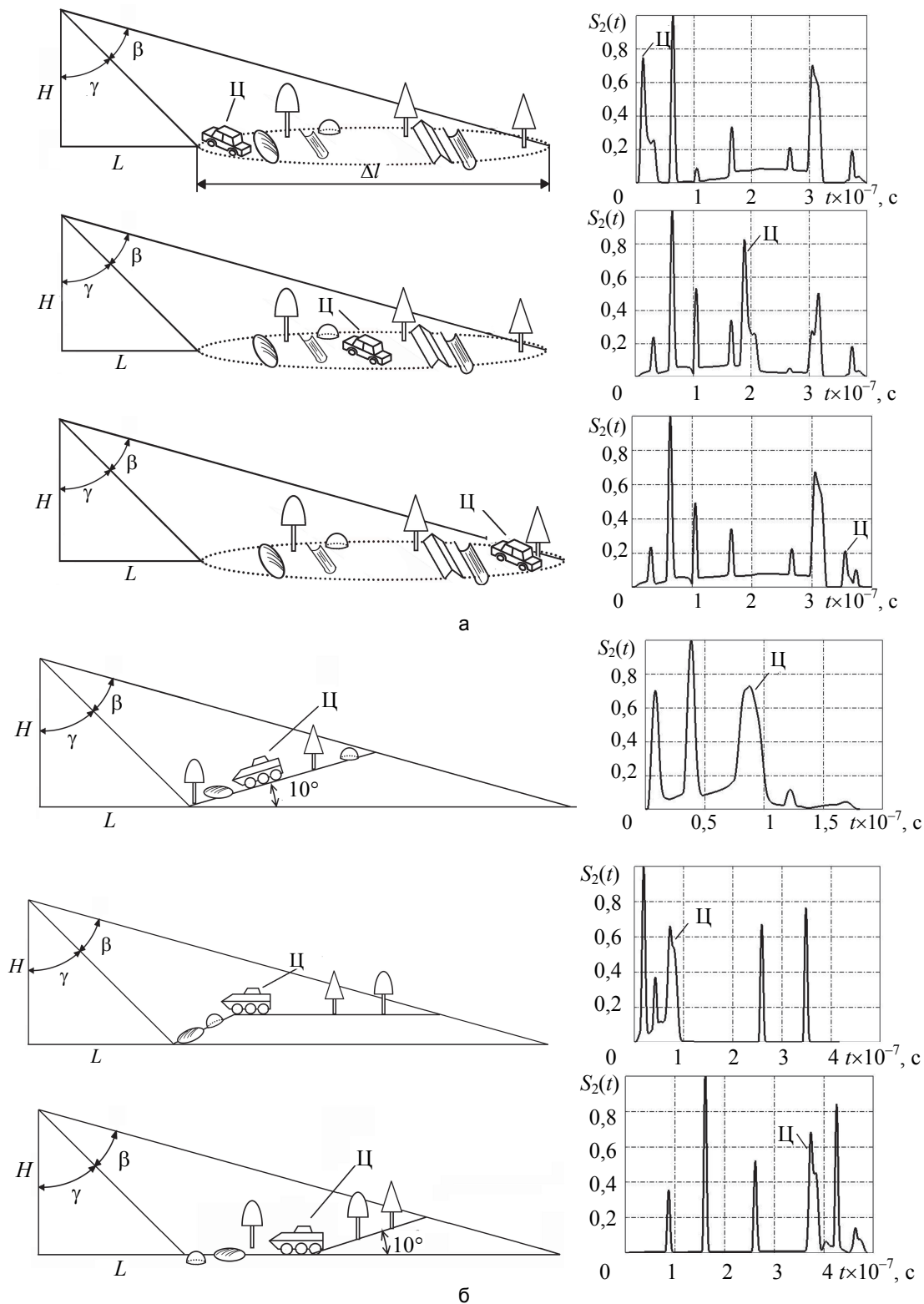


Рис. 1. Выбросы от целей: (машина) при разных местонахождениях целей (а); (бронемашина) при разных подстилающих поверхностях (б). $S_2(t)$ – отраженный сигнал при облучении коротким зондирующим лучистым импульсом $S_1(t)$, Ц – сигнальный выброс от объекта (цели) до которого определяется наклонная

дальность, γ – угол визирования

При измерениях наклонной дальности с летательных аппаратов до наземных объектов продольная протяженность облучаемого участка поверхности может составлять десятки и даже сотни метров [10]. Например, при высоте носителя $H = 500$ м, на расстояниях до цели по горизонтали (рис. 1) $L = 5000$ м, угле поля излучения $\beta = 2'$ продольная протяженность облучаемой поверхности составляет $\Delta l = 29$ м, при $H = 200$ м – $\Delta l = 73$ м. При $L = 10000$ м и тех же остальных данных $\Delta l = 300$ м. В этих условиях отражательная импульсная характеристика облучаемой поверхности будет протяженной по длительности, а отраженный сигнал будет представлять интегральную свертку этой отражательной характеристики и зондирующего (излучаемого) импульса.

Кроме этого, отражение от подстилающей поверхности может иметь несколько энергетических центров, нивелирующих истинную цель [11–13].

На рис. 1 приведены примеры нормированных по величине наибольшего сигнального выброса временных функций отраженных сигналов при измерении наклонной дальности, полученные методом компьютерного моделирования.

Как видим из приведенных выше временных функций отраженных сигналов от цели, расположенной на поверхности со сложной пространственной структурой, при измерении больших наклонных дальностей с малых высот даже при достаточно узких полях излучения идентифицировать сигнальный выброс от цели не представляется возможным. В такой ситуации предлагается использовать два способа измерения наклонной дальности.

Метод измерения наклонной дальности при совмещении нижнего края поля излучения с линией визирования

Первый предлагаемый метод заключается в совмещении линий визирования прицела с нижним краем поля излучения, считая, что поле излучения имеет форму, близкую к прямоугольной. В этом случае первый принимаемый сигнальный выброс в принимаемой реализации можно считать отражением от цели, так как от нее сначала осуществляется отражение излучаемого лучистого потока. Структурная схема такого дальномера тривиальная и представлена на рис. 2.

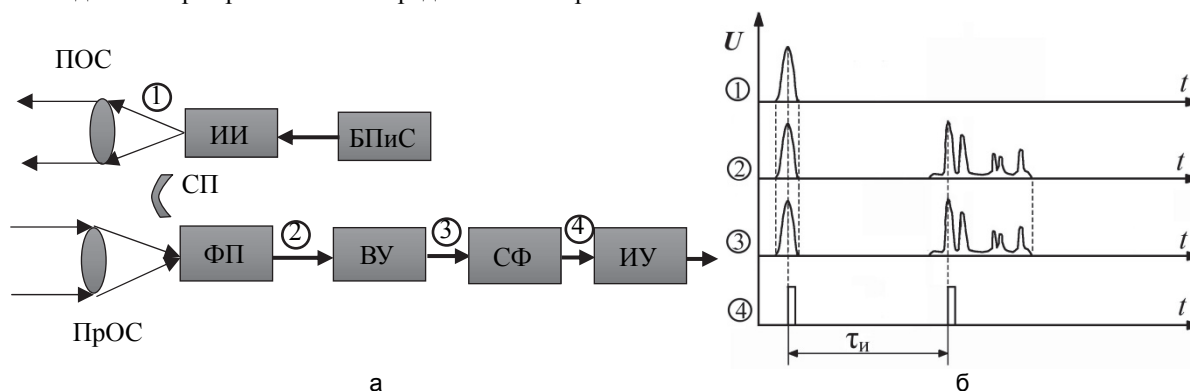


Рис. 2. Структурная схема дальномера с использованием первого принимаемого сигнального выброса: функциональная схема (а); временные диаграммы (б)

На рис. 2 приведены следующие обозначения: ПОС – передающая оптическая система; ИИ – лазерный импульсный источник излучения; БПиС – блок питания лазера и синхронизации (запуск излучения); СП – светопровод, отвечающий часть излучаемой энергии к фотоприемнику (ФП) для формирования сигнала, соответствующего моменту излучения; ПрОС – приемная оптическая система; ВУ – видеоусилитель, формирующий необходимую передаточную функцию приемно-усилительного тракта; СФ – схемы фиксации временного положения сигнала; ИУ – измерительное устройство (измеритель временного интервала); U – напряжение.

Использование такой схемы предусматривает, что первый сигнальный выброс является носителем информации о дальности. При этом погрешность измерения, как и обнаружительная способность, будут определяться энергией этого выброса. Таким образом, при сложной структуре отраженного сигнала такой способ измерения наклонной дальности приводит к существенным (до 10 раз) энергетическим потерям. Эти энергетические потери влияют не только на условия обнаружения, но и на потенциальную точность измерения, которая определяется дисперсией оценки времени запаздывания сигнала. Следует отметить, что в условиях инерционного приема [14] вследствие сужения полосы пропускания приемно-усилительного тракта может происходить перекрытие сигнальных выбросов от цели и подстилающей поверхности на выходе приемного тракта, что требует существенного расширения ширины полосы пропускания, а следовательно, приводит к снижению энергетических и точностных характеристик дальномера.

Метод измерения наклонной дальности с использованием отраженного сигнала только от подстилающей поверхности при совмещении верхнего края поля излучения с линией визирования

Второй предлагаемый метод измерения наклонной дальности заключается в совмещении линии визирования прицела с верхним краем поля излучения и применении согласованного фильтра для любой принимаемой реализации [10, 15]. В этом случае временное положение максимума сигнала на выходе приемно-усилительного тракта будет соответствовать пространственному положению цели. При этом измерение проводится по сигналу, отраженному только от подстилающей поверхности перед целью (рис. 3).

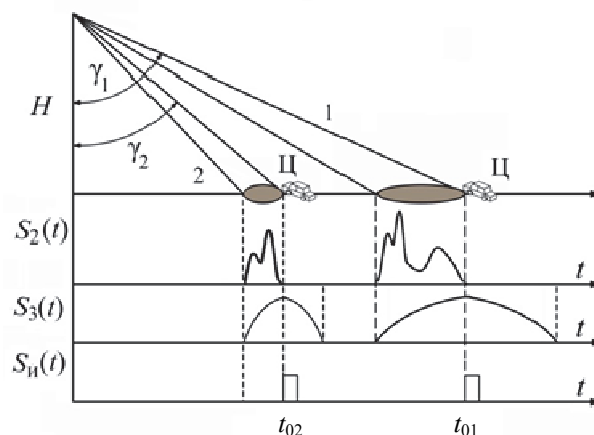


Рис. 3. Временные диаграммы измерения наклонной дальности при использовании отражения только от подстилающей поверхности перед целью при двух значениях угла визирования цели: H – высота носителя; γ – угол визирования; Ц – цель; $S_2(t)$ – сигнал на входе согласованного фильтра; $S_3(t)$ – сигнал на выходе согласованного фильтра; $S_n(t)$ – сигнал на выходе схемы фиксации временного положения сигнала; t_0 – моменты времени, соответствующие максимуму сигнала на выходе согласованного фильтра

На рис. 3 представлены два варианта при измерении наклонной дальности: при большом угле визирования γ_1 и относительно малом угле визирования γ_2 . При этом энергетические потери, присущие первому способу измерения, почти отсутствуют.

Проблемой, возникающей при использовании этого метода, является случайный характер длительности и формы принимаемого сигнала, которые зависят как от структуры подстилающей поверхности, так и высоты носителя и расстояния до цели.

Однако максимум выходного эффекта, являющийся взаимно корреляционной функцией входных реализаций с импульсными характеристиками, имеющий такую же длительность, может оказаться сдвинутым относительно окончания принимаемой реализации сигнала (что естественно для взаимно корреляционной функции двух процессов). Исключением является свертка любого сигнала с прямоугольным импульсом той же длительности, что и сигнал. Только в этом случае, независимо от формы входного сигнала, максимум выходного сигнала по времени будет соответствовать пространственному положению цели. Отсюда следует, что необходимо использовать согласованный фильтр для прямоугольного импульса с перестраиваемой длительностью импульсной характеристики. Согласованный фильтр для прямоугольного импульса имеет структуру, представленную на рис. 4.

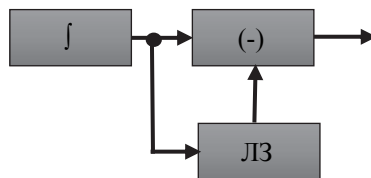


Рис. 4. Структурная схема согласованного фильтра для прямоугольного импульса. Фильтр состоит из (\int) интегратора линий задержки (ЛЗ), соответствующей длительности принимаемого сигнала, и вычитающего устройства (-)

Таким образом, чтобы осуществлять измерение наклонной дальности при любых условиях, необходимо иметь регулируемую линию задержки в соответствии с длительностью принимаемого сигнала.

Естественно, что для реализации рассматриваемого метода измерения следует использовать схему, в которой использовалась бы информация о длительности принимаемого сигнала. Следует предваритель-

но определять длительность принимаемого сигнала, а затем осуществляет оптимальную обработку входной реализации и фиксацию выходного эффекта по максимуму. Использование фиксации сигнала по максимуму его значения позволяет получить минимально возможную погрешность оценки времени запаздывания. При наиболее неблагоприятных ситуациях длительность отраженного сигнала будет достаточно велика (например, при высоте носителя $H=500$ м и угле поля излучения $\beta=2'$ на дистанциях 10000 м длительность принимаемой реализации составляет 0,85 мкс при зондирующем импульсе 5 нс). Однако даже в этом случае использование рассматриваемого метода для заданных погрешностей измерения (например, $\sigma=\pm 10$ м) энергический выигрыш по отношению к первому методу будет составлять 3,5 раза.

В качестве реализации рассматриваемого метода измерения предлагаем следующую структурную схему дальномера, представленную на рис. 5.

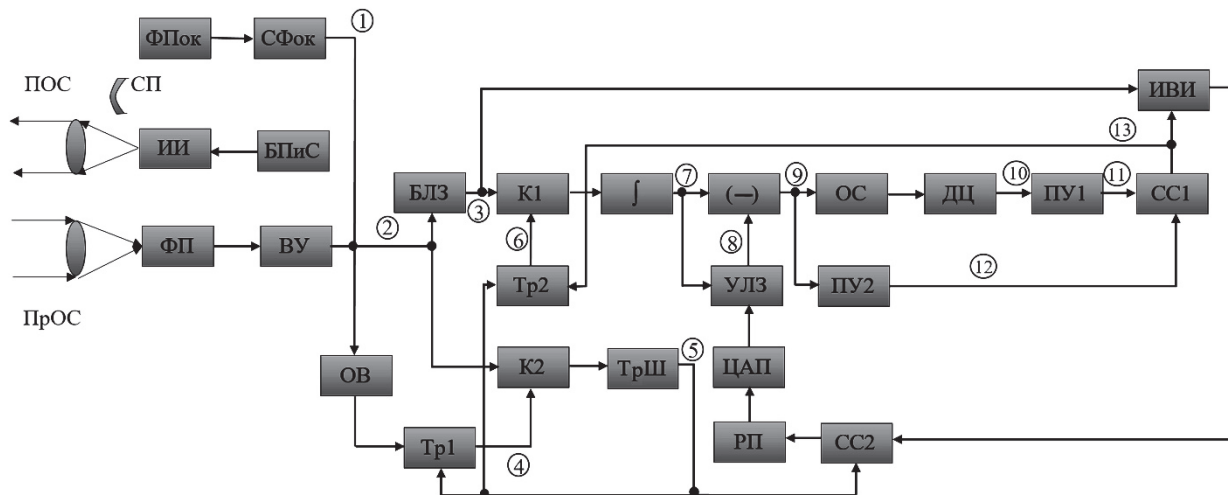


Рис. 5. Функциональная схема дальномера для измерения наклонной дальности

На схеме рис. 5 приведены следующие обозначения: ФПок – фотоприемник опорного канала; СФок – схема фиксации временного положения момента излучения; ПОС – передающая оптическая система; ИИ – лазерный импульсный источник излучения; БПиС – блок питания и синхронизации излучения (схема запуска); ПрОС – приемная оптическая система; ВУ – видеоусилитель с полосой пропускания, позволяющей без искажения пропускать принимаемую реализацию сигнала; К1, К2 и К3 – управляемые ключи; БЛЗ – быстродействующая линия задержки; ОВ – одновибратор, формирующий прямоугольный импульс с длительностью, соответствующей минимальной измеряемой дальности; Тр1 и Тр2 – триггеры (с отдельными выходами); ТрШ – триггер Шмидта; РП – регистр памяти; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; СС1, СС2 – схемы совпадения; \int – интегратор; (-) – вычитающее устройство; УЛЗ – управляемая линия задержки (изменяющая величину задержки в зависимости от длительности принимаемой сигнальной реализации); ОС – ограничитель снизу; ДЦ – дифференцирующая цепочка; ПУ1 – пороговое устройство (с уровнем срабатывания, близким к нулю); ПУ2 – пороговое устройство (с уровнем срабатывания, равным ограничению снизу, определяемым вероятностью ложной тревоги); ИВИ – измеритель временного интервала.

На рис. 6 приведены временные диаграммы, поясняющие работу схемы.

При наведении на цель осуществляется запуск ИИ. Часть излучаемой энергии отводится посредством светопровода. Стандартный сигнал с выхода схемы фиксации опорного канала (ФПок) поступает на БЛЗ, которая без искажений задерживает этот сигнал на время τ_1 примерно равное двойной длительности наиболее протяженного отраженного сигнала. Фронтом задержанного опорного сигнала запускается схема ИВИ.

Одновременно с поступлениями опорного сигнала на БЛЗ он запускает ОВ, формирующий прямоугольный импульс, длительность которого τ_2 соответствует минимальной измеряемой дистанции (наличие такой задержки позволяет уменьшить аномальную погрешность измерения дальности). Спадом импульса ОВ триггер Тр1 переводится из состояния 0 в состояние 1, открывая ключ К2.

Опорный сигнал с выхода БЛЗ в согласованный фильтр не проходит, так как ключ К1 закрыт нулевым потенциалом триггера Тр2.

Отраженный сигнал от подстилающей поверхности после усиления в ВУ с полосой пропускания, не искажающей его по длительности, поступает одновременно на БЛЗ и через открытый ключ К2 – на ТрШ, который формирует прямоугольный импульс с длительностью, равной длительности входного сигнала (учитывая гистерезис срабатывания ТрШ). Длительность импульса с выхода ТрШ посредством СС2,

на которую поступают высокочастотные счетные импульсы от ГСИ измерителя временных интервалов, РП и ЦАП пропорционально преобразуется в величину напряжения для управления временем задержки УЛЗ. При этом спадом импульса, снимаемого с ТрШ, триггер Тр1 переводится в исходное состояние, закрывая ключ К2. Одновременно спадом этого импульса триггер Тр2 переводится в состояние 1 и открывает ключ К1.

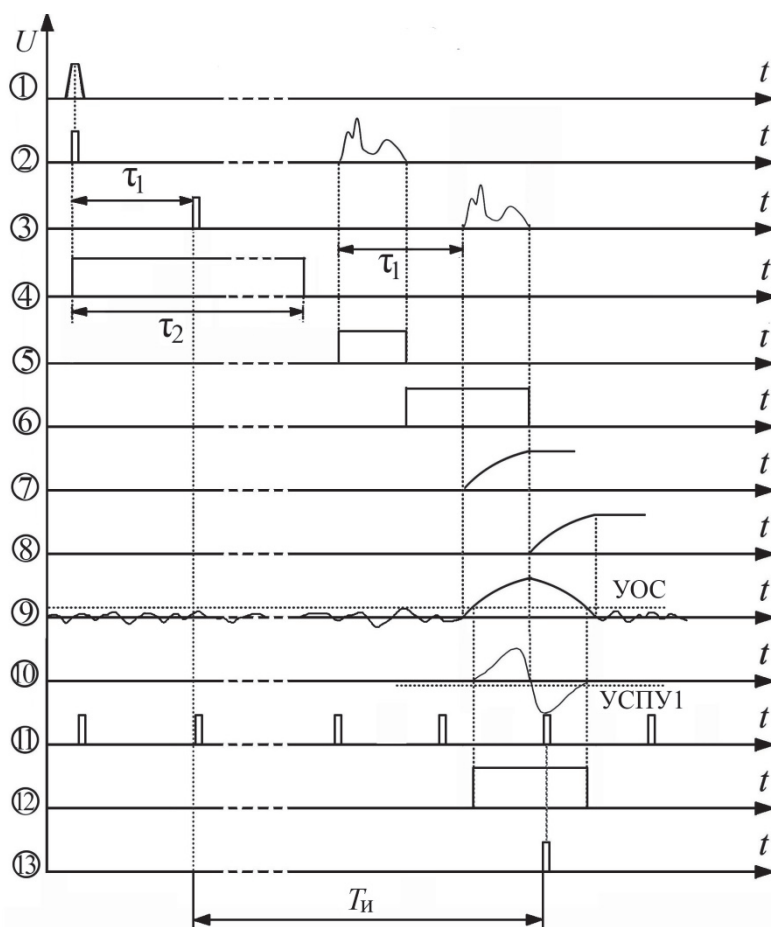


Рис. 6. Временные диаграммы, поясняющие работу схемы измерения наклонной дальности.
УОС – уровень ограничения снизу; УСПУ1 – уровень срабатывания ПУ1

Задержанный в БЛЗ принимаемый сигнал через ключ К1 поступает в согласованный фильтр, состоящий из интегратора (∫), УЛЗ и вычитающего устройства (-). На выходе этого фильтра формируется сигнал в виде свертки принимаемого сигнала с прямоугольным импульсом с одинаковыми длительностями. Этот сигнал поступает на схему фиксации максимума сигнала, состоящего из ограничителя снизу (ОС), дифференцирующей цепи (ДЦ), двух пороговых устройств (ПУ1 и ПУ2) и схемы совпадений (СП1). При этом уровень срабатывания ПУ1 близок к нулю, а схемами ПУ2 и СП1 осуществляется временная селекция: пропускается только стандартный импульс от ПУ1, фронт которого соответствует положению максимума сигнала на выходе согласованного фильтра, а следовательно, пространственному положению цели, до которой измеряется наклонная дальность. Фронтом этого импульса при использовании простой счетной схемы ИВИ триггер переводится в исходное состояние, и в счетчике будет записано соответствующее число импульсов. При известном периоде следования счетных импульсов определяется измеряемый временной интервал $T_{и}$, соответствующий измеряемой наклонной дальности.

Следует заметить, что, как показывает анализ погрешностей времени запаздывания, ошибка оценки времени запаздывания для приведенной схемы в 2,5 раза меньше, чем при фиксации сигнала по спаду принимаемого сигнала.

Заключение

Таким образом, из предложенных двух методов задача измерения наклонной дальности может быть решена с наименьшими энергетическими и точностными потерями методом с использованием отраженного сигнала только от подстилающей поверхности. С другой стороны, этот метод реализуется более сложным схемным решением.

Литература

1. Yang J., Wang X., Gao Y. Accuracy study of time delay estimation techniques in laser pulse ranger // *Proceedings of SPIE*. 2013. V. 9046. Art. 90461D. doi: 10.1117/12.2038131
2. Koshelev A.V., Lesnykh I.V., Seredovich V.A., Sinjakin A.K., Karpik A.P. High precision pulsing laser ranger // *Proceedings of SPIE*. 2002. V. 4900. P. 534–536. doi: 10.1117/12.484607
3. Rongguo F., Chula S., Mengxi L., Yiliang G., Yu C., Benkang C. The research of the laser facula of laser ranger finder in the far distance // *Proceedings of SPIE*. 2011. V. 7912. Art. 79121Z. doi: 10.1117/12.873565
4. Stratan A., Zorila A., Rusen L., Nemes G. Measuring effective area of spots from pulsed laser beams // *Optical Engineering*. 2014. V. 53. N 12. doi: 10.1117/1.OE.53.12.122513
5. Zhen W., Lv X.Y., Mao J.-J., Liu W., Yang D. Method of high precision interval measurement in pulse laser ranging system // *Proceedings of SPIE*. 2013. V. 8905. doi: 10.1117/12.2033725
6. Chen R., Jiang Y. Measurement method of time-of-flight in pulsed laser ranging // *Proceedings of SPIE*. 2014. V. 9297. doi: 10.1117/12.2068379
7. Munteanu I., Miclo S. Portable laser rangefinder short pulses measurements // *Proceedings of SPIE*. 2003. V. 5227. P. 452–455.
8. Amann M.C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., Rioux M. Laser ranging a critical review of usual techniques for distance measurement // *Optical Engineering*. 2001. V. 40. N 1. P. 10–19. doi: 10.1117/1.1330700
9. Jutzi B., Eberle B., Stilla U. Estimation and measurement of backscattered signals from pulsed laser radar // *Proceedings of SPIE*. 2003. V. 4885. P. 256–267. doi: 10.1117/12.463086
10. Лебедев Е.Г. Системы импульсной оптической локаций. СПб.: Лань, 2014. 368 с.
11. Ле Д., Лебедев Е.Г. Анализ отражательных характеристик подстилающей поверхности при измерении наклонной дальности // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2016. Т. 59. № 7. С. 571–577. doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-7-571-577
12. Ле Д., Нгуен Д.Т. Анализ отраженных сигналов при измерении наклонной дальности // *Сборник трудов IV Всероссийского конгресса молодых ученых*. Санкт-Петербург, 2015. С. 236–240.
13. Ле Д. Анализ отраженных сигналов от подстилающей поверхности // *Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО*. 2015. Т. 2. С. 104–106.
14. Лебедев Е.Г. Системы оптической локации Ч.2: Учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 129 с.
15. Лебедев Е.Г. Системы оптической локации Ч.3: Учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 110 с.

Авторы

Ле Дин Ву – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Ldву81@rambler.ru
Лебедев Евгений Георгиевич – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, eleb@rambler.ru

References

1. Yang J., Wang X., Gao Y. Accuracy study of time delay estimation techniques in laser pulse ranger. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 9046, art. 90461D. doi: 10.1117/12.2038131
2. Koshelev A.V., Lesnykh I.V., Seredovich V.A., Sinjakin A.K., Karpik A.P. High precision pulsing laser ranger. *Proceedings of SPIE*, 2002, vol. 4900, pp. 534–536. doi: 10.1117/12.484607
3. Rongguo F., Chula S., Mengxi L., Yiliang G., Yu C., Benkang C. The research of the laser facula of laser ranger finder in the far distance. *Proceedings of SPIE*, 2011, vol. 7912, art. 79121Z. doi: 10.1117/12.873565
4. Stratan A., Zorila A., Rusen L., Nemes G. Measuring effective area of spots from pulsed laser beams. *Optical Engineering*, 2014, vol. 53, no. 12. doi: 10.1117/1.OE.53.12.122513
5. Zhen W., Lv X.Y., Mao J.-J., Liu W., Yang D. Method of high precision interval measurement in pulse laser ranging system. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 8905. doi: 10.1117/12.2033725
6. Chen R., Jiang Y. Measurement method of time-of-flight in pulsed laser ranging. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 9297. doi: 10.1117/12.2068379
7. Munteanu I., Miclo S. Portable laser rangefinder short pulses measurements. *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 5227, pp. 452–455.
8. Amann M.C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., Rioux M. Laser ranging a critical review of usual techniques for distance measurement. *Optical Engineering*, 2001, vol. 40, no. 1, pp. 10–19. doi: 10.1117/1.1330700
9. Jutzi B., Eberle B., Stilla U. Estimation and measurement of backscattered signals from pulsed laser radar. *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 4885, pp. 256–267. doi: 10.1117/12.463086
10. Lebed'ko E.G. *Sistemy Impul'snoi Opticheskoi Lokatsii [Pulsed Optical Location Systems]*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2014, 368 p.
11. Le L.D., Lebedko Y.G. Analysis of reflection characteristics of the underlying surface at slant range measurement. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, vol. 59, no. 7, pp. 571–577. (In Russian) doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-7-571-577
12. Le L.D., Nguen V.T. Analysis of reflected signals in the measurement of the oblique range. *Proc. 4th All-Russian Congress of Young Scientists*. St. Petersburg, 2015, pp. 236–240. (In Russian)
13. Le L.D. Analysis of reflected signals from the underlying surface. *Almanac of Scientific Works of Young Scientists of ITMO University*, 2015, vol. 2, pp. 104–106. (In Russian)
14. Lebedko Y.G. *Optical Location Systems, Part. 2*. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2012, 129 p. (In Russian)
15. Lebedko Y.G. *Optical Location Systems, Part. 3*. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2013, 110 p. (In Russian)

Authors

Le Dinh Vu – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Ldву81@rambler.ru
Evgeny G. Lebedko – D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, eleb@rambler.ru