УДК 53.082.5, 621.38

Обзорная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2026-19-9-5-12

Разработка приемного устройства с амплитудным детектированием сигнала

И. С. Писарев✉, А. А. Ухов, Д. К. Кострин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ ilya.pisarev91@gmail.com

Аннотация. Рассмотрено устройство измерения дальности на основе прямого измерения времени прохождения лазерного импульса с использованием адаптивного порога срабатывания. В аппаратной реализации была использована автоматическая регулировка усиления для исключения искажения принимаемого сигнала на близких дистанциях и обеспечения необходимого уровня сигнала при измерении больших расстояний. Адаптивный порог срабатывания реализован с помощью генерации убывающей аналоговой функции обратно пропорциональной квадрату расстояния. Благодаря анализу природы возникновения шумов в приемном тракте устройства было выбрано оптимальное соотношение сигнал/шум, равное 5. Проведен сравнительный эксперимент с аппаратно более сложным устройством, основанным на высокочастотной оцифровке эхолокационных трасс. Измерения проводились до объектов с разными геометрическими и оптическими параметрами. Полученные результаты демонстрируют, что при благоприятных метеорологических условиях точность и дальность измерений оказываются сопоставимыми с более сложными системами.

Ключевые слова: измерение расстояния, лазерный дальномер, зондирующее устройство, точность измерения, уровень шума, амплитудное детектирование сигнала

Для цитирования: Писарев И. С., Ухов А. А., Кострин Д. К. Разработка приемного устройства с амплитудным детектированием сигнала // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 9. С. 5–12. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-5-12.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Review article

Development of a Receiver with Amplitude Detection of the Signal

I. S. Pisarev✉, A. A. Uhov, D. K. Kostrin

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ ilya.pisarev91@gmail.com

Abstract. This paper considers a range-finding device based on direct time-of-flight measurement of a laser pulse using an adaptive triggering threshold. The hardware implementation employs automatic gain control to prevent distortion of the received signal at short ranges and to ensure the required signal level when measuring long distances. The adaptive threshold is realized by generating a decreasing analog function proportional to the square of the distance. Based on an analysis of the noise sources in the receiver channel, the optimal signal-to-noise ratio was chosen as 5. A comparative experiment was conducted with a more complex hardware device based on high-frequency digitization of echo traces. Measurements were performed on targets with different geometric and optical parameters. The obtained results demonstrate that under favorable meteorological conditions, the accuracy and range of measurements are comparable to those of more sophisticated systems.

© И. С. Писарев, А. А. Ухов, Д. К. Кострин, 2026

Keywords: distance measurement, laser rangefinder, probing device, measurement accuracy, noise level, amplitude detection of the signal

For citation: Pisarev I. S., Uhov A. A., Kostrin D. K. Development of a Receiver with Amplitude Detection of the Signal // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 9. P. 5–12. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-5-12.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Введение. Использование лазерных дальномеров для точного определения дальности широко используется в таких отраслях, как геодезия, навигация и картография. Востребованность подобных устройств обусловлена малыми габаритами, массой, а также простотой интеграции в различные измерительные и сканирующие системы [1].

Существует несколько основных аппаратных реализаций, применяемых в зависимости от задач, в которых используется лазерный дальномер. Они отличаются друг от друга обеспечиваемой точностью получаемых измерений и максимальной дальностью действия [2]. Косвенный метод работы преимущественно сводится к точной оценке фазового сдвига между непрерывно излучаемым модулированным сигналом и сигналом, принимаемым после отражения от цели. Данный подход требует непрерывной работы оптического излучателя, что накладывает определенные ограничения на энергопотребление системы. Из-за физических особенностей этот метод применяется преимущественно для работы на относительно коротких дистанциях, не превышающих 500 м [3], [4]. В данной статье рассматривается метод прямого измерения времени прохождения импульса, который позволяет работать на значительно больших дальностях. Максимальная рабочая дистанция такого дальномера ограничена мощностью излучателя и чувствительностью тракта приемного канала [5]. Методы прямого измерения базируются на высокоточном определении временного промежутка между двумя короткими дискретными сигналами, которые сигнализируют аппаратной части о начале (сигнал СТАРТ, синхронизированный с моментом излучения импульса) и конце (сигнал СТОП) цикла измерения. Сигнал СТОП формируется электронной схемой с помощью регистрации характерных событий на эхолокационной трассе при получении отраженного сигнала приемным каналом.

Существует множество алгоритмов обработки принимаемого импульса, которые концептуально можно объединить в три основные группы:

– постоянный порог срабатывания;

– пиковое детектирование;

– адаптивный порог срабатывания.

Методы, основанные на постоянном пороге срабатывания, используются в простейших системах и имеют существенные недостатки при измерении сигналов малой дальности. Настроенный на малый сигнал приемный канал будет подвержен помехе обратного рассеяния, обусловленной отражением зондирующего лазерного луча от атмосферного аэрозоля. Кроме того, поскольку измерение осуществляется исключительно по амплитуде сигнала, неизбежно возникает ошибка блуждания (walking error). В зависимости от оптических параметров, отражательной способности и положения объекта в пространстве, форма и амплитуда отраженного импульса будут варьироваться, что неизбежно приведет к смещению момента фиксации сигнала и ошибке в вычислении расстояния [6].

Альтернативой выступают методы пикового детектирования, основанные на определении максимальной амплитуды принимаемого сигнала, которые считаются наиболее точными. В таких системах происходит оцифровка всей эхолокационной трассы с частотой дискретизации более 200 МГц, что позволяет анализировать нарастание лазерного импульса с высоким временным разрешением [7]. Использование дополнительных математических алгоритмов цифровой фильтрации позволяет нивелировать воздействие помех, а также осуществлять селекцию полезного сигнала на основе полученной при лазерном зондировании эхолокационной трассы [8]. Однако данный метод требует дорогостоящего и энергозатратного аппаратного обеспечения. В связи с этим появляется потребность в разработке решения, обладающего помехозащищенностью и простотой реализации простейших систем с амплитудным детектированием.

Постановка задачи. В рамках данной статьи рассматривается прибор, совмещающий принципы амплитудного детектирования и адаптивного порога срабатывания. Предлагаемое устройство позволяет расширить диапазон измерений с использованием относительно несложного аппаратного обеспечения до 12 км при показателе метеорологической дальности видимости (МДВ) 24 км. Дополнительную задачу представляет проведение сравнительного испытания, основанного на высо-

кочастотной оцифровке эхолокационной трассы, с более сложным устройством при разных метеорологических условиях. Ключевыми параметрами сравнения служат помехозащищенность устройств, дальность и точность измерений, а также потребляемая мощность.

Описание работы устройства. Классическая схема пикового детектора функционирует по принципу фиксации и запоминания максимального значения амплитуды входного сигнала на строго определенном интервале времени, после завершения которого выполняется обязательный аппаратный или программный сброс. Однако использование данной схемы накладывает на разрабатываемый прибор ряд ограничений. Основная сложность заключается в специфике реальных измерений: время отклика отраженного сигнала не константа и может принимать случайные значения в очень широком динамическом диапазоне. Ситуация дополнительно усложняется тем, что при горизонтальном зондировании на пути следования лазерного луча часто оказывается не одна, а сразу несколько целей, каждая из которых формирует свой отраженный оптический импульс. Классическая схема с фиксированным интервалом в таких непредсказуемых условиях будет работать некорректно, неизбежно пропуская часть полезных сигналов или фиксируя ложные срабатывания. Это делает применение классических подходов в рамках поставленной задачи невозможным.

Для решения данной задачи использовался метод амплитудной регистрации сигнала с помощью быстродействующего компаратора (КП), структурная схема разработанного устройства представлена рис. 1. Запуск лазерного излучения формирует сигнал СТАРТ, который инициирует отсчет времени, а также необходим для начала генерации кусочной функции порога срабатывания. Отраженный от объекта оптический сигнал проходит через каскад усилителей приемного канала. Поскольку устройство должно работать как на близких, так и на средних дистанциях, оно оснащено автоматической регулировкой усиления (АРУ). Это делает усилитель менее чувствительным к изменению динамического диапазона сигнала, что снижает нелинейные искажения на близких дистанциях [9]. Применение АРУ также позволяет упростить процедуру калибровки устройства в условиях динамически меняющегося уровня принимаемого сигнала.

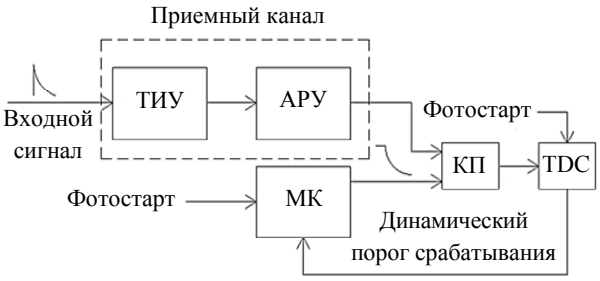


Рис. 1. Структурная схема устройства
Fig. 1. Devices structure scheme

Динамический порог срабатывания реализуется с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) микроконтроллера (МК) путем формирования кусочной функции, состоящей из трех частей, как показано на рис. 2. Первая часть задает «мертвое время», которое соответствует длительности помехи обратного рассеяния. Значение функции на промежутке $t < t_1$ равняется напряжению $U_{\max}$, которое превышает напряжение насыщения приемного тракта, что исключает возможность ложного срабатывания. Вторая часть – убывающая функция в соответствии с законом ослабления сигнала, обратно пропорционального квадрату расстояния. Последняя часть постоянный уровень напряжения U_{SNR}, которое соответствует заданному соотношению сигнал/шум SNR (signal-to-noise ratio). Такая форма динамического порога позволяет получить дополнительную помехозащищенность на близких дистанциях, в отличие от методов, основанных на принципе постоянного порога срабатывания. Напряжение порога срабатывания и оптического сигнала сравниваются с помощью быстродействующего компаратора, и если амплитуда оптического сигнала выше, то формируется сиг-

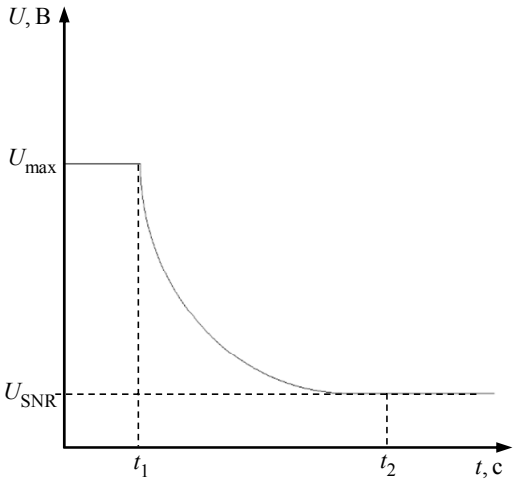


Рис. 2. Временная диаграмма генерации динамического порога срабатывания
Fig. 2. Time diagram of adaptive threshold generation

нал СТОП для микросхемы таймера TDC (time-to-digital converter). В течение одного измерения он способен принять до пяти сигналов СТОП.

По завершении измерения время, полученное таймером, передается в микроконтроллер, который преобразует его в дальность и отправляет информацию пользователю на персональный компьютер. Дальность работы прибора и тип объекта, который можно зондировать с его помощью определяется чувствительностью, зависящей от электрических характеристик приемного канала.

Оценка чувствительности устройства. Основная метрика, характеризующая чувствительность устройства, является SNR. Считается, что оптимальное значение данного коэффициента должно быть не менее 5 [10]. Выбор порогового значения обусловлен необходимостью обеспечить приемлемо низкую вероятность ложного срабатывания компаратора от шумовых выбросов при сохранении достаточной чувствительности к слабым отраженным сигналам. Снижение данного коэффициента ниже указанного значения приводит к росту вероятности ложных срабатываний, поскольку амплитудное распределение шума приемного тракта близко к нормальному, а превышение порога шумовым выбросом становится статистически значимым при SNR < 5. Увеличение коэффициента, в свою очередь, сокращает максимальную дальность действия устройства, поскольку амплитуда полезного сигнала убывает по закону, обратно пропорциональному квадрату расстояния.

Приемный канал устройства состоит из фотодиода и двух каскадов усиления, каждый из которых является источником шумов, влияющих на итоговое соотношение SNR [11]. Компоненты шума, имеющие различную природу его возникновения, вносят разный вклад в конечный результат. Разработанная система имеет большую полосу пропускания для возможности регистрации зондирующих импульсов лазерного излучения длительностью 10 нс [12], поэтому основной вклад вносят шумовые, широкополосные, составляющие.

Тепловой шум обусловлен движением носителей заряда в резисторе цепи обратной связи операционного усилителя. Его значение определяется выражением

$$I_{\text{т.ш}} = \sqrt{\frac{4k\tau\Delta f}{R}}, \qquad (1)$$

где $I_{\text{т.ш}}$ – среднеквадратическое значение тока теплового шума; k – постоянная Больцмана; τ – температура резистора; Δf – полоса пропускания прибора; R – эквивалентное сопротивление нагрузки.

Основным источником дробового шума служит его квантовая природа, определяемая дискретностью процесса фотодетектирования. Для фотодиода дробовой шум определяется как

$$I_{\text{д.ш}} = \sqrt{2q\left(I_{\text{т.ф}} + I_{\text{фт}} + I_{\text{ф.з}}\right)\Delta f}, \qquad (2)$$

где $I_{\text{д.ш}}$ – среднеквадратическое значение тока дробового шума; q – заряд электрона; $I_{\text{т.ф}}$ – темновой ток фотодиода; $I_{\text{фт}}$ – фототок; $I_{\text{ф.з}}$ – ток фоновой засветки.

Получим общее уравнение для тока, вызванного шумами, воспользовавшись формулами (1) и (2):

$$I_{\text{ш}} = \Delta f\sqrt{\left(\frac{4k\tau}{R}\right)^2 + \left[2q\left(I_{\text{т.ф}} + I_{\text{фт}} + I_{\text{ф.з}}\right)\right]^2}. \qquad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что так как ток фоновой засветки в дневное время суток может превышать темновой ток фотодиода, вклад фоновой составляющей дробового шума – определяющий при работе устройства в условиях естественного освещения. Это накладывает дополнительные требования на оптическую фильтрацию приемного тракта.

Определив шумовые характеристики, необходимо оценить мощность полезного оптического сигнала, отраженного от объекта. Для этого была использована физическая модель с однократным рассеянием фотонов, а тип рассеяния света от поверхности был выбран ламбертовский. В общем виде уравнение лидарного зондирования выглядит следующим образом:

$$P(\lambda, r) = P_0\left(S/r^2\right)T^2(r)\eta(\lambda)G(r), \qquad (4)$$

где P – детектируемая мощность; λ – длина волны лазерного излучения; r – расстояние до зондируемого объекта; P_0 – мощность лазерного излучения; S – площадь поверхности приемника; S/r^2 – телесный угол, который определяет, какая доля рассеянного света попадает обратно в приемник лазерного дальномера; T – пропускание атмосферы при допущении, что рассеяние упругое; η – коэффициент эффективности системы; G – геометрическая функция лазерного дальномера.

Тогда SNR, с учетом заданного соотношения (3), рассчитывается по формуле

$$\text{SNR} = P\beta_{\text{ф}}/I_{\text{ш}} > 5,$$

где SNR – соотношение сигнал/шум; $\beta_{\text{ф}}$ – чувствительность фотодиода.

На основе выражения (4) можно сделать вывод, что интенсивность принимаемого сигнала от расстояния имеет убывающую квадратичную зависимость, поэтому для исключения ложных срабатываний от фоновых засветок и помехи обратного рассеяния на близких дистанциях необходимо использовать функцию динамического порога срабатывания. Она генерируется таким образом, чтобы повторять теоретическую функцию затухания сигнала, что позволяет повысить помехозащищенность устройства. Поскольку функция генерируется аналоговым образом, то итоговое соотношение SNR включает себя шум приемного канала устройства, полученный по формуле (3) и шумовую составляющую тракта формирования динамического порога срабатывания. Схема включает в себя ЦАП микроконтроллера и операционный усилитель, выполняющий функцию буферизации выходного сигнала ЦАП перед подачей на компаратор. Каждый из элементов тракта вносит собственную составляющую шума. Для их минимизации в схеме был использован фильтр нижних частот.

Оценка эффективности работы устройства. Для проверки эффективности предложенного устройства были проведены сравнительные испытания приемных каналов, основанных на разных принципах регистрации сигнала: с динамическим порогом срабатывания и амплитудным детектированием сигнала, а также на высокочастотной оцифровке эхолокационной трассы с последующим определением полезного сигнала. Потребляемая мощность устройств регистрации сигнала составляет 0.8 и 4 Вт соответственно. Для обеспечения корректности сравнения оба устройства испытывались с использованием одинаковых испытательных стендов.

Испытательный стенд, представленный на рис. 3, состоит из приемного канала, включающего в себя фотоприемник и одно из сравниваемых устройств регистрации сигнала, блока питания и управления, оптического прицела для точного наведения на зондируемый объект, а также излучателя, параметры которого приведены в табл. 1. Оптический прицел обеспечивал совмещение оси визирования с осью излучения с угловой точностью не хуже 0.1 мрад, что исключает систематическую погрешность наведения при зондировании объектов с малым угловым размером на предельных дальностях. Синхронизация начала цикла измерения для сравниваемых устройств осуществлялась с помощью фотодиода, встроенного в корпус лазерного излучателя, что обеспечило идентичность условий измерения при поочередном использовании измерительных устройств, основанных на разных принципах работы.

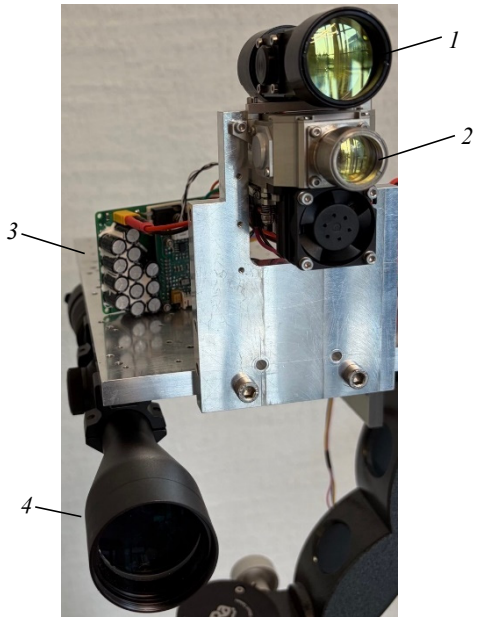


Рис. 3. Экспериментальный стенд:
1 – приемный канал; *2* – излучатель лазерный;
3 – блок питания и управления;
4 – оптический прицел
Fig. 3. Experimental stand: *1* – receiving channel;
2 – laser emitter; *3* – power supply and control device; *4* – aiming sight

Табл. 1. Технические характеристики излучателя
Tab. 1. Technical characteristics of the laser emitter

Характеристика	Значение
Длина волны, нм	1064
Энергия излучения, мДж	20
Длительность импульсов, нс	8 ± 3
Расходимость лазерного излучения, мрад	0.24
Диаметр выходного телескопа, мм	12

Зондируемые объекты классифицировались по дальности расположения относительно точки измерения и угловым размерам и представляли собой дома, трубы и ферменные конструкции. Выбор объектов зондирования обусловлен необходимостью охватить характерный для практических задач диапазон отражающих свойств и геометрических параметров целей. При проведении испытаний также учитывался класс объекта. Дома представляли собой большие протяженные цели, размеры которых превышают размеры лазерного пятна, тогда как трубы и элементы ферменных конструкций на больших дальностях формируют угловой размер, сопоставимый с расходимостью луча, что приближает условия эксперимента к зондированию точечных целей и позволяет оценить работоспособность устройства в

наиболее неблагоприятном случае с точки зрения отраженной от объекта энергии. Каждый объект был прозондирован 5 тыс. раз, что позволило получить устойчивую оценку среднеквадратического отклонения (СКО) и минимизировать влияние случайных выбросов, связанных с кратковременными изменениями условий окружающей среды. Такой объем выборки достаточен для достижения статистической значимости результата при доверительной вероятности 0.95. Значение SNR для каждого из устройств было выбрано равным 5. Эксперимент проводился при разных значениях МДВ, что позволяет сделать вывод о сценариях использования прибора в разных погодных условиях. В табл. 2 приведены результаты эксперимента, сравнивающие два прибора измерения дальности до объектов с разными угловыми размерами и при разных погодных условиях.

Результат эксперимента показал, что при ухудшении погодных условий чувствительность устройства с динамическим порогом срабатывания снижается: с уменьшением прозрачности атмосферы амплитуда отраженного сигнала для объектов с малой отражательной способностью или значительной удаленностью падает ниже установленного порога срабатывания (SNR = 5), в результате чего устройство с амплитудным детектированием оказывается неспособно зарегистрировать сигнал СТОП. В свою очередь устройство, основанное на высокочастотной оцифровке эхолокационной трассы, в аналогичных условиях сохраняет работоспособность за счет возможности цифровой обработки слабого сигнала на фоне шума, что и объясняет отсутствие пропусков в соответствующей части табл. 2.

Также из-за особенностей амплитудного детектирования сигнала и влияния ошибки, связанной с формой отраженного импульса от объектов с разными геометрическими и оптическими свойствами, была получена меньшая точность по сравнению с устройством, основанным на высокочастотной оцифровке эхолокационной трассы, но при этом погрешность измерения составляет не больше 0.1 %, что представляет удовлетворительный результат.

Заключение. В статье рассмотрено устройство измерения дальности на основе прямого замера времени прохождения лазерного импульса с использованием адаптивного порога срабатывания. В аппаратной реализации был использован АРУ для исключения искажения принимаемого сигнала на близких дистанциях и обеспечения необходимого уровня сигнала при измерении больших расстояний. Адаптивный порог срабатывания реализован с помощью генерации убывающей аналоговой функции обратно пропорциональной квадрату расстояния. Экспериментальное сравне-

Табл. 2. Результаты эксперимента
Tab. 2. Experimental results

Измерительный прибор	Объект	МДВ, км	Фактическая дальность, м	Измеренная дальность, м	СКО, м
Устройство с динамическим порогом срабатывания	Ферменная конструкция	24	7021.0	7021.5	1.60
		17		7021.7	1.60
	Многоквартирный дом 1	24	10 025.2	10 025.3	1.55
		17		–	–
	Труба 1	24	9305.0	9305.6	1.50
		17		–	–
	Многоквартирный дом 2	24	7807.0	7807.3	1.65
		17		7807.3	1.65
	Многоквартирный дом 3	24	12 367.0	12 367.4	1.60
		17		–	–
	Труба 2	24	11 210.0	11 210.5	1.55
		17		–	–
Устройство с высокочастотной оцифровкой эхолокационной трассы	Ферменная конструкция	24	7021.0	7021.0	1.37
		17		7021.0	1.37
	Многоквартирный дом 1	24	10 025.2	10 025.0	1.36
		17		10 025.0	1.36
	Труба 1	24	9300.0	9300.3	1.38
		17		9300.3	1.38
	Многоквартирный дом 2	24	7807.0	7807.2	1.34
		17		7807.2	1.34
	Многоквартирный дом 3	24	12 367.0	12 367.0	1.35
		17		12 367.0	1.36
	Труба 2	24	11 210.0	11 200.0	1.35
		17		11 200.0	1.35

ние показало, что при благоприятных метеорологических условиях (МДВ 24 км) относительная погрешность измерения дальности разработанным устройством не превышает 0.1 % по сравнению с устройством, основанным на высокочастотной оцифровке эхолокационной трассы, а потребляемая мощность предложенного решения оказывается ниже. Основное ограничение метода амплитудного детектирования представляет снижение чувствительности при ухудшении прозрачности атмосферы, что связано с невозможностью регистрации сигнала СТОП при амплитуде отраженного сигнала ниже установленного порога срабатывания, поскольку, в отличие от метода высокочастотной оцифровки, принцип амплитудного детектирования не предполагает анализа формы всей эхолокационной трассы. Разработанное устройство характеризуется существенно более простой аппаратной реализацией и меньшим энергопотреблением, что делает использование прибора в ряде практических задач оправданным.

Список литературы

1. Korpela I., Hovi A., Korhonen L. Backscattering of individual LiDAR pulses from forest canopies explained by photogrammetrically derived vegetation structure // ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing. 2013. Vol. 83. P. 81–93. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.06.002.

2. Methods of precise distance measurements for laser rangefinders with digital acquisition of signals / M. Muzal, M. Zygmunt, P. Knysak, T. Drozd, M. Jakubaszek // Sensors. 2021. Vol. 21, no. 19. P. 6426. doi: 10.3390/s21196426.

3. Indirect time-of-flight 3D ranging based on SPADs / S. Bellisai, F. Villa, S. Tisa, D. Bronzi, F. Zappa // Proc. of SPIE – The Intern. Soc. for Optical Engin. 2012. Vol. 8268. P. 82681C. doi: 10.1117/12.908222.

4. Liu Y. The application and optimization of phase method in laser distance measurement // J. of Phys.: Conf. Series. 2021. Vol. 1881. P. 022002. doi: 10.1088/1742-6596/1881/2/022002.

5. Berkovic G., Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements // Advances in Optics and Photonics. 2012. Vol. 4, no. 4. P. 441–471. doi: 10.1364/AOP.4.000441.

6. Reduction of range walk error in direct detection laser radar using a Geiger mode avalanche photodiode / M. S. Oh, H. J. Kong, T. H. Kim, K. H. Hong, B. W. Kim // Optics Commun. 2010. Vol. 283, no. 2. P. 304–308. doi: 10.1016/j.optcom.2009.10.009.

7. Utilization of full-waveform data in airborne laser scanning applications / A. Ullrich, M. Hollaus, C. Briese, W. Wagner, M. Doneus // Proc. of SPIE – The Intern. Soc. for Optical Engin. 2007. Vol. 6550. P. 65500S. doi: 10.1117/12.725573.

8. Писарев И. С., Ухов А. А. Селекция полезного сигнала на основе анализа эхолокационной трассы с использованием методов машинного обучения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 30–38. doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-30-38.

9. A double threshold correction method for walk error in pulsed laser ranging system / J. Yang, X. Liu, G. Gu, W. Qian, K. Ren, J. Zhang, P. Guo, Q. Gao, Q. Chen // Infrared Phys. and Technol. 2019. Vol. 100. P. 28–36. doi: 10.1016/j.infrared.2019.03.023.

10. Laser range sensors / K. C. Bahuguna, P. Sharma, N. S. Vasan, S. P. Gaba // Defence Sci. J. 2007. Vol. 57, no. 6. P. 881–890. doi: 10.14429/dsj.57.1827.

11. Design of low-noise photodetector with a bandwidth of 130 MHz based on transimpedance amplification circuit / J. Qin, Z. Yan, M. Huo, X. Jia, K. Peng // Chinese Optics Lett. 2016. Vol. 14. P. 122701. doi: 10.3788/COL201614.122701.

12. Kurtti S., Nissinen J., Kostamovaara J. A wide dynamic range CMOS laser radar receiver with a time-domain walk error compensation scheme // IEEE Trans. on Circuits and Syst. I: Regular Papers. 2017. Vol. 64, no. 3. P. 550–561. doi: 10.1109/TCSI.2016.2619762.

Информация об авторах

Писарев Илья Сергеевич – аспирант кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: ilya.pisarev91@gmail.com

Ухов Андрей Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: aauhov@yandex.ru
http://orcid.org/0000-0002-3744-0777

Кострин Дмитрий Константинович – д-р техн. наук, профессор кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: dkkostrin@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-6284-0246

References

1. Korpela I., Hovi A., Korhonen L. Backscattering of individual LiDAR pulses from forest canopies explained by photogrammetrically derived vegetation structure // ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing. 2013. Vol. 83. P. 81–93. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.06.002.

2. Methods of precise distance measurements for laser rangefinders with digital acquisition of signals / M. Muzal, M. Zygmunt, P. Knysak, T. Drozd, M. Jakubaszek // Sensors. 2021. Vol. 21, no. 19. P. 6426. doi: 10.3390/s21196426.

3. Indirect time-of-flight 3D ranging based on SPADs / S. Bellisai, F. Villa, S. Tisa, D. Bronzi, F. Zappa // Proc. of SPIE – The Intern. Soc. for Optical Engin. 2012. Vol. 8268. P. 82681C. doi: 10.1117/12.908222.

4. Liu Y. The application and optimization of phase method in laser distance measurement // J. of Phys.: Conf. Series. 2021. Vol. 1881. P. 022002. doi: 10.1088/1742-6596/1881/2/022002.

5. Berkovic G., Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements // Advances in Optics and Photonics. 2012. Vol. 4, no. 4. P. 441–471. doi: 10.1364/AOP.4.000441.

6. Reduction of range walk error in direct detection laser radar using a Geiger mode avalanche photodiode / M. S. Oh, H. J. Kong, T. H. Kim, K. H. Hong, B. W. Kim // Optics Commun. 2010. Vol. 283, no. 2. P. 304–308. doi: 10.1016/j.optcom.2009.10.009.

7. Utilization of full-waveform data in airborne laser scanning applications / A. Ullrich, M. Hollaus, C. Briese, W. Wagner, M. Doneus // Proc. of SPIE – The Intern. Soc. for Optical Engin. 2007. Vol. 6550. P. 65500S. doi: 10.1117/12.725573.

8. Pisarev I. S., Uhov A. A. Selekcija poleznogo signala na osnove analiza jeholokacionnoj trassy s ispol'zovaniem metodov mashinnogo obuchenija // Izv. vuzov Rossii. Radiojelektronika. 2026. T. 29, № 2. S. 30–38. doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-30-38. (In Russ.).

9. A double threshold correction method for walk error in pulsed laser ranging system / J. Yang, X. Liu, G. Gu, W. Qian, K. Ren, J. Zhang, P. Guo, Q. Gao, Q. Chen // Infrared Phys. and Technol. 2019. Vol. 100. P. 28–36. doi: 10.1016/j.infrared.2019.03.023.

10. Laser range sensors / K. C. Bahuguna, P. Sharma, N. S. Vasan, S. P. Gaba // Defence Sci. J. 2007. Vol. 57, no. 6. P. 881–890. doi: 10.14429/dsj.57.1827.

11. Design of low-noise photodetector with a bandwidth of 130 MHz based on transimpedance amplification circuit / J. Qin, Z. Yan, M. Huo, X. Jia, K. Peng // Chinese Optics Lett. 2016. Vol. 14. P. 122701. doi: 10.3788/COL201614.122701.

12. Kurtti S., Nissinen J., Kostamovaara J. A wide dynamic range CMOS laser radar receiver with a time-domain walk error compensation scheme // IEEE Trans. on Circuits and Syst. I: Regular Papers. 2017. Vol. 64, no. 3. P. 550–561. doi: 10.1109/TCSI.2016.2619762.

Information about the authors

Ilya S. Pisarev – postgraduate student of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: ilya.pisarev91@gmail.com

Andrey A. Uhov – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: aauhov@yandex.ru
http://orcid.org/0000-0002-3744-0777

Dmitry K. Kostrin – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: dkkostrin@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-6284-0246

Статья поступила в редакцию 10.07.2026; принята к публикации после рецензирования 11.08.2026; опубликована онлайн 27.11.2026.

Submitted 10.07.2026; accepted 11.08.2026; published online 27.11.2026.