Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-129-150

Подход и алгоритм оценки допустимых значений отношения сигнал/шум лидаров роботов в условиях внешних воздействий

М.В. Мамченко ¹ 🖂

¹Лаборатория киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук

ул. Профсоюзная, д. 65, г. Москва 117997, Российская Федерация

🖂 e-mail: markmamcha@gmail.com

Резюме

Цель исследования заключается в обеспечении безопасного функционирования робототехнических средств за счет разработки методов, подходов и алгоритмов обработки информации и описания их функционирования.

Методы. В работе предлагается подход к оценке допустимого отношения сигнал/шум (ОСШ) для лидаров роботов на основе заданной вероятности появления «ложной тревоги» в условиях непреднамеренных воздействий. В основе представленного синтезированного вероятностного подхода лежат физические основы инфракрасного излучения и байесовская теория с применением критерия Неймана-Пирсона. Особенностью предлагаемого подхода является использование в аналитическом аппарате не только заданного порога появления ложной тревоги и вероятности возникновения интерференции, но и учет характеристик фотоприемных устройств лидаров. Это позволяет аналитически рассчитать величину допустимого ОСШ при стабилизации уровня «ложных тревог» на фоне шумов, вызванных данным видом помех.

Результаты. Сформированные и представленные в работе зависимости могут использоваться в качестве одной из эксплуатационных характеристик при разработке и выборе оптоэлектронной системы измерения лидаров. Исходя из фиксированного значения «ложной тревоги» и полученного графического выражения полученной рабочей характеристики (полученных характеристик) возможно подобрать лидар с необходимыми техническими параметрами.

Заключение. Разработан вероятностный подход и соответствующий алгоритм выбора порогового значения ОСШ, основанный на сущности критерия Неймана-Пирсона. Подход позволяет минимизировать значение вероятности «игнорирования» объекта при сканировании за счет недопущения превышения вероятности «ложной тревоги» заданного порогового значения. Представлено математическое и методологическое обеспечение для проектирования лидаров с учетом априорной оценки допустимого значения ОСШ и вероятности обнаружения отраженного импульса, без учета предварительных оценок вероятностных характеристик обнаружения объектов лидаром. В представленном алгоритме на вход подается набор необработанных данных – в виде значений полученного сигнала с шумовой составляющей. Выходные данные представлены множеством зависимостей вероятности ошибок для различных пороговых значений отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: вероятностный подход; лидар; отношение сигнал/шум; ОСШ; ложная тревога; критерий Неймана-Пирсона; помеха; внешние воздействия.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.



[©] Мамченко М.В., 2022

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2022; 26(3): 129-150

Финансирование: Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06044.

Благодарности: Автор выражает благодарность и признательность научному сотруднику лаборатории киберфизических систем ИПУ РАН Романовой Марии Андреевне за существенный вклад в подготовку и написание настоящей статьи.

Для цитирования: Мамченко М.В. Подход и алгоритм оценки допустимых значений отношения сигнал/шум лидаров роботов в условиях внешних воздействий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(3): 129-150. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-129-150.

Поступила в редакцию 12.07.2022

Подписана в печать 29.07.2022

Опубликована 30.09.2022

Approach and Algorithm for Evaluating the Allowed Signal/Noise Ratio of Robotic Lidars under External Influences

Mark V. Mamchenko ¹

¹ Cyberphysical Systems Lab., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences 65, Profsoyuznaya str., Moscow 117997, Russian Federation

⊠ e-mail: markmamcha@gmail.com

Abstract

Purpose or research. The aim of the study is to ensure the safe operation of robotics by developing methods, approaches and algorithms for information processing, and describing their functioning.

Methods. The paper proposes an approach to estimation allowed signal/noise ratio (SNR) for robotic LiDARs based on the predetermined probability of occurrence of «false alarm» under unintended influences. The synthesized probabilistic approach is based on the physical fundaments of infrared radiation, and the Bayesian theory using the Neyman-Pearson criterion. The feature of the proposed approach is the use of the given threshold of «false alarm» occurrence, and the probability of occurrence of interference in the analytical apparatus, as well as consideration of the characteristics of photodetectors. This allows expressing analytically and calculating the value of the allowed SNR when stabilizing the level of «false alarms» against background noise caused by this type of interference.

Results. The formed and presented dependencies can be used as one of the operating characteristics in the development and selection of optoelectronic system of LiDAR's measurement system. Based on the fixed value of «false alarm», and the resulting graphical expression of the operating characteristic (obtained characteristics) it is possible to choose a LiDAR's system with necessary technical parameters.

Conclusion. The probabilistic approach and the corresponding algorithm for selecting the threshold SNR value based on the Neyman-Pearson criterion were developed. The approach allows minimizing the probability of «ignoring» the object when scanning, since the probability of «false alarm» does not exceed the given threshold value. Mathematical and methodological support for the design of LiDARs is presented, taking into account a priori estimation of the allowed SNR value, and the probability of reflected pulse detection, without preliminary estimates of probabilistic characteristics of object detection. The presented algorithm has a set of raw data (in the form of the values of the received signal with a noise component) as an input. Its output is represented by a set of error probability dependencies for different SNR thresholds.

Keywords: probabilistic approach; LiDAR; signal/noise ratio; SNR; false alarm; Neyman-Pearson criterion; interference; external influences.

Conflict of interest. The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The reported study was partially funded by RFBR, number 19-29-06044.

Acknowledgement: The author expresses gratitude and appreciation to Mariya A. Romanova, researcher of Cyberphysical Systems Laboratory of ICS RAS, for the significant contribution to the preparation and writing of this article.

For citation: Mamchenko M. V. Approach and Algorithm for Evaluating the Allowed Signal/Noise Ratio of Robotic Lidars under External Influences. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2022; 26(3): 129-150 (In Russ.). https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-3-129-150.

Received 12.07.2022

Accepted 29.07.2022

Published 30.09.2022

Введение

Методы и подходы, используемые для противодействия преднамеренным и непреднамеренным воздействиям на лидары в основном заключаются в совершенствовании физических (использование новых конструкций лидаров, типов модуляции и оптических частот, псевдослучайной перестройки рабочей частоты и т.д.) и программных компонентов (обнаружение аномалий данных, снижение шумов, проверка целостности полученной информации, внедрение новых схем обработки облаков точек с использованием фильтров и т.д.) [1-17]. Вместе с тем, внесение изменений в аппаратные и программные составляющие лидаров для повышения их робастности являются достаточно дорогостоящим, ресурсо- и трудоемким процессом [18-22].

Уменьшение влияния различного рода помех на функционирование лидара неразрывно связано с увеличением значения отношения сигнал/шум (ОСШ) для целевого объекта. Решение задачи повышения ОСШ за счет использования соответствующих методов и подходов также позволяет достичь цели повышения робастности и защищенности лидаров от воздействий различных помех. ОСШ на выходе фотодетектора является основным параметром, описывающим производительность под-системы приема лидара [23-26]. В свою очередь, вероятность обнаружения сигнала напрямую связана с ОСШ, выбранным пороговым значением для обнаружения отраженного сигнала и решением о наличии или отсутствии полезного входного сигнала [27, 28]. Кроме того, в исследованиях [29, 30] рассматривается возможность взаимного наведения помех несколькими лидарами, расположенными в пределах досягаемости друг друга, что ухудшает условия для выявления препятствий. Однако вероятность наступления этих событий не учитывается.

В связи с этим предложен вероятностный подход к оценке допустимого ОСШ для лидаров и вероятность обнаружения отраженного импульса основана на математической статистике и определении порога ОСШ с использованием критерия Неймана-Пирсона, поскольку он не требует априорной ин-

формации об окружающих объектах и вероятностных характеристиках обнаружения. Учитывая известное распределение ошибок, можно вывести вероятность ошибок из ОСШ, установив различные пороговые значения. Кроме того, согласно критерию Неймана-Пирсона, также можно выбрать значение порогового значения, при котором обеспечивается минимальная вероятность «пропуска» объекта при сканировании (учитывая, что «ложная тревога» также не превышает некоторого заданного значения).

Материалы и методы

Описание подхода и алгоритма

Для учета вероятности «ложной тревоги», в том числе в условиях взаимного наведения помех несколькими лидарами, предлагается вероятностный подход, для подсчета «ложных событий» или проще говоря образованных «ложных точек» при сканировании пространства с учетом гауссовского распределения помех. Описанный подход основан на известном методе определения вероятности ошибок в радиолокации.

В начале необходимо сформировать массивы состояний измерительной системы, в данном случае рассматривается лидар, при различных внешних дестабилизирующих воздействиях и при отсутствии их. Способ формирования подобных массивов:

1. Детектирование или выделение пришедшего импульса следует предста-

вить в виде совокупности всех возвратных импульсов:

$$DImp = \left(d_{r_j} \cap d_{disr_j}\right), \qquad (1)$$

где DImp – сформированное множество детектируемых импульсов, $d_{r_j} \in \{d_{r_1}, d_{r_2}, ..., d_{r_n}\}$ – сформированное множество возвратных импульсов от рассматриваемого лидара; $d_{disr_j} \in \{d_{disr_1}, d_{disr_2}, ..., d_{disr_n}\}$ – сформированное множество импульсов от лидаров, расположенных в пределах досягаемости друг друга, а также от многократного переотражения импульсов от объектов в пространстве.

2. Сгенерировать совокупность значений для вероятности «ложных тревог»:

 пограничные условия для интерференции переотраженных импульсов лазерного излучения от рассматриваемого лидара:

$$\left\{ d_{r_j} \in \{D_r\} \mid D_{interf} \cup Q, q_k \in \{Q\} \right\};$$
(2)

- пограничные условия для детектирования (выделения) зондирующего импульса от лидаров, расположенных в пределах досягаемости друг друга:

$$\left\{ \mathbf{d}_{\mathbf{r}_{j}} \in \{\mathbf{D}_{\mathbf{r}}\} \mid \mathbf{D}_{\mathbf{p}} \cup \mathbf{Q}, \mathbf{q}_{\mathbf{k}}^{'} \in \{\mathbf{Q}^{'}\} \right\},$$
(3)

где D_r – сформированное множество возвратных импульсов от рассматриваемого лидара для соответствующего множества D_{interf} ; D_{interf} – множество значений интерференционных импульсов; D_p – множество зондирующих импульсов от лидаров, расположенных в пределах досягаемости друг друга; Q – множество способствующих факторов и

Мамченко М.В.

воздействий для интерференции переотраженных импульсов; Q' – множество условий для детектирования зондирующих импульсов от лидаров, расположенных в пределах досягаемости друг друга.

3. Определение переходной матрицы детектирования «ложного события»:

 – для интерференции переотраженных импульсов лазерного излучения от рассматриваемого лидара:

$$\left\{\exists ! \in \left\{S_{d_{r_j}}\right\} | \sum_{j=1}^{n} P_{ij} = 0,05,q_k\right\};$$
 (4)

 – для детектирования (выделения)
 зондирующего импульса от лидаров,
 расположенных в пределах досягаемости друг друга:

$$\left\{ \exists ! \in \left\{ S_{d_{\text{disr}_{j}}} \right\} \left| \sum_{j=1}^{n} P_{ij} = 0,05, q_{k}' \right\},$$
 (5)

где $S_{d_{r_j}}$ – множество оценок параметров импульсов от рассматриваемого лидара, $S_{d_{disr_j}}$ – множество оценок параметров импульсов от лидаров, расположенных в пределах досягаемости друг друга; P_{ij} – вероятность регистрации «ложного события» для каждого импульса лазерного излучения при определенных способствующих факторах и событиях (если вероятность правильного обнаружения возвратного импульса лазерного излучения принять 0,95, тогда вероятность «ложных событий» будет составлять 0,05).

После того, как сформированы массивы состояний измерительной системы (лидара) при различных внешних дестабилизирующих воздействиях, которые уменьшают вероятность правильного обнаружения возвратного импульса, можно приступить к следующему шагу.

Если в общем применить простую концепцию, когда существуют два варианта события: регистрация возвратного импульса и регистрация «ложного события», и когда известны вероятности данных событий, тогда возможно применить Байесовский метод. Однако чаще всего априорная информация при локации пространства не известна, поэтому лучше использовать критерий Неймана-Пирсона. При таком подходе фиксируем значение вероятности регистрации «ложного события» (данное значение вероятности не должно превышать 0,05). Вероятность Р_d правильного обнаружения измерительным устройством (лидаром) возвратного импульса от объекта на фоне гауссовского (нормального) шума рассчитывается согласно выражению:

$$P_d = \Phi(\varpi - \varpi_n),$$
 (6)

где $\Phi(Z)$ – интегральное распределение вероятности обнаружения импульса:

$$\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$
 (7)

Зная зависимость вероятности обнаружения возвратного импульса от ОСШ, можно определить максимальное значение шума.

Для этого введем две гипотезы.

Гипотеза 1 (H1): Принятый (обнаруженный) сигнал содержит только шум.

Гипотеза 2 (H2): Принятый сигнал не содержит шума.

Согласно описанию сформулированной бинарной задачи, связанная с

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2022; 26(3): 129-150

принятием решения о приеме только шума (гипотеза H1) или о приеме полезного сигнала (гипотеза H2), возможно описать вероятности появления этих событий.

Тогда вероятность появления «ложной точки» будет описываться выражением:

$$P_{\rm F} = \iint_{G_0} p\left(\overline{z}/_{\rm H1}\right) d\overline{z}, \tag{8}$$

а вероятность обнаружения полезного сигнала (импульса):

$$P_{\rm D} = \iint_{G_1} p(\bar{z}/_{\rm H2}) \, d\bar{z}, \tag{9}$$

где \bar{z} - все зафиксированные наблюдения;

 $p(\bar{z}/_{H1})$ – плотность распределения наблюдений, относящихся к гипотезе H1;

 $p(\bar{z}/H2)$ – плотность распределения наблюдений, относящихся к гипотезе H0;

Данные вероятности априорно неизвестны, поэтому возможно применить критерий Неймана-Пирсона. Для этого необходимо решить задачу на нахождение безусловного экстремума, воспользовавшись функцией Лагранжа в виде:

$$F_{\lambda} = \lambda P_{F_0} + \iint_{G_1} \left(p(\overline{z}/_{H2}) - \lambda p(\overline{z}/_{H1}) \right) d\overline{z}. (10)$$

Используя тот же опыт, что и при Байесовском методе определяем критерии качества, т.е. можно определить какие точки из области наблюдений \bar{z} включить в область G₁, чтобы F_{λ} была максимальна. Если подинтегральное выражение при какой-либо точке наблюдения положительно, тогда данную точку наблюдения надо включать в область G₁. Если же подинтегральное выражение оказывается отрицательным, то тогда данную точку из z необходимо включить в область G₀.

Запишем условие, сформулированное выше:

$$p(\overline{z}/H1) > p(\overline{z}/H2) \rightarrow H2;$$

$$\Lambda = \frac{p(zH2)}{p(\overline{z}H1)} \begin{cases} < \lambda \rightarrow H2 \\ \le \lambda \rightarrow H1 \end{cases}$$
(11)

В данном случае записан оптимальный алгоритм по критерию Неймана-Пирсона. Используя этот алгоритм мы получим максимум вероятность правильного обнаружения при фиксированной вероятности ложной тревоги:

$$\int_{\lambda}^{\infty} p(\lambda H2) = P_{F_0}, \qquad (12)$$

где *P*_{*F*₀} – фиксированное значение «ложной тревоги».

Порог вероятности ложной тревоги будет определяться:

$$P_{F}=P_{F_{0}}; \int_{\lambda}^{\infty} \omega(\Lambda H1) \alpha \Lambda = P_{F_{0}}.$$
(13)

Рассмотрим применение описанного выше алгоритма определения вероятности ложной тревоги для данных по мощности сигнала лидара. Предполагается, что лидар установлен на движущийся объект (робота), поэтому с большей вероятностью мощности отдельных сигналов распределены по закону Релея.

Математически запишем плотность распределения Релея:

$$p(\bar{z}_i|H2) = \frac{z_i}{\sigma^2(1+q)} e^{-(\frac{z_i^c}{2\sigma^2(1+q)})},$$
 (14)

где $q = \frac{\sigma_{signal}}{\sigma_{noise}}$ – это значение отношения сигнал/шум;

σ-коэффициент масштаба.

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2022; 26(3): 129-150

Воспользуемся отношением правдоподобия, тогда совместная плотность распределения:

$$\omega\left(\overline{z}/_{H2}\right) = \frac{\prod_{i=1}^{n} z_i}{\sigma^{2n}(1+q)} e^{-\frac{1}{2\sigma(1+q)}\sum_{i=1}^{n} z_i}.$$
 (15)

Введем переменную:

$$T = \sum_{i=1}^{n} z_i^2,$$
 (16)

где Т – сумма наблюдений.

Для этой переменной плотность распределения, когда сигнал отсутствует, опишем выражением:

$$\omega(-\bar{z}/H1) = \frac{\prod_{i=1}^{n} z_{i}}{\sigma^{2n}} e^{-\frac{1}{2\sigma^{2}}T};$$

$$\Lambda = \frac{1}{(1+q)^{n}} e^{\frac{1}{2\sigma^{2}}\left(\frac{q}{1+q}\right)T}.$$
(17)

Так как $\left(\frac{q}{1+q}\right)$ и (1+q) – величины известны, поэтому проверка гипотезы максимального обнаружения выглядит следующим образом:

$$T$$
 { >T₀→ H2 (сигнал присутствует) (18)
 ≤T₀→H1 (сигнал отсутствует).

Согласно вышенаписанному условию необходимо сумму наблюдений сравнить с порогом отношения сигнал/шум:

$$\sum_{i=1}^{n} z_i^2 \gtrless T_0. \tag{19}$$

Найти величину суммы случайных величин эта задача довольно сложная. Но можно воспользоваться допущением из теории вероятности: сумма большого числа маленьких величин распределена по нормальному закону. По известной плотности распределения «ложных точек» задаемся вероятностью определения и определяем порог значения отношения сигнал/шум.

Основные этапы предложенного подхода можно представить в виде алгоритма нахождения зависимости правильного обнаружения сигнала от «ложных тревог», представленного на рис. 1.

Формирование набора данных

При проведении пространственного сканирования, а также при разработке оптоэлектронных подсистем лидаров для математического представления входной мощности принимаемого лазерного сигнала, коэффициента ослабления $a(\lambda, r)$ и коэффициента обратного рассеяния $\beta(\lambda, r)$ воспользуемся формулами из статьи [31]:

$$P_{r}(\lambda, r) = \eta_{all} \eta_{g}(r) P_{0} \left[\frac{c\tau}{2}\right] \frac{A_{tel}}{r^{2}} \times \beta(\lambda, r) e^{-2\int_{0}^{r} \alpha(\lambda, r) dr} + P_{bg}, \qquad (20)$$

 $\beta(\lambda,r)=\beta_a(\lambda,r)+\beta_m(\lambda,r);$

$$\alpha(\lambda, \mathbf{r}) = \alpha_{a}(\lambda, \mathbf{r}) + \alpha_{m}(\lambda, \mathbf{r}), \qquad (21)$$

где Р₀ – пиковая мощность импульса лазера;

r – дальность, с которой принимается сигнал;

λ – длина волны лазера;

 η_{all} – общая эффективность лидара;

с – скорость света;

 τ – длительность лазерного импульса;

 $\eta_q(\mathbf{r})$ – геометрический фактор (max $f_0(\eta_q(\mathbf{r}))=1)$);

> A_{tel} – площадь приемного телескопа; Р_{bq} – мощность фонового сигнала.

а и m – индексы, которые определяют аэрозольную и молекулярную компоненты соответственно.

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2022; 26(3): 129-150

Алгоритм 1. Нахождение зависимости правильного обнаружения сигнала от «ложных тревог» Входные данные: (1) количество наблюдений n; (2) вектор наблюдений $\bar{z}\{z_1, z_2, \dots z_n\} // \bar{z} \in G \ (\bar{z}/G_0 \in G_0; \bar{z}/G_1 \in G_1); G_0 + G_1 = G;$ // Априорные вероятности этих п наблюдений неизвестны. Выходные данные: рабочая характеристика $P_D(P_F)$, т.е. зависимость правильного обнаружения сигнала от «ложных тревог» с заданными значениями ОСШ для $P_{F_0} = const = \varepsilon$ H2 = 1 // гипотеза о приеме полезного сигнала *H*1 = 0 // гипотеза о приеме шума $P_D \in p(\bar{z}/H2) \rightarrow H2$ $P_F \in p(\bar{z}/H1) \rightarrow H1$ $P_F = \iint_{G_0} p(\bar{z}/H1) d\bar{z}$ $P_D = \iint_{-} p(\bar{z}/H2) d\bar{z}$ если $P_F + P_D = 1$, тогда $P_{F_{H2}} = lpha$ // вероятность ошибки I рода ($p(ar{z}/H1)
ightarrow H2$) $P_{D_{H1}}=eta$ // вероятность ошибки II рода ($p(ar{z}/H2)
ightarrow H1$) конец_если если $\alpha = \varepsilon = P_{F_0}$, тогда $\beta \rightarrow min$ конец если $\int p(\Lambda / H2) d\Lambda \leq \alpha$ $\overset{j}{\alpha} = p(\bar{z}/H2)$ $\varepsilon = P_{F_0} = \int_{1}^{1} p(\lambda / H2)$ найти λ $\Lambda = \frac{p(z/H2)}{p(\bar{z}/H1)} \begin{cases} < \lambda \to H2 \\ \le \lambda \to H1 \end{cases}$ q = OCIII $\sigma^2 = \frac{\Sigma (z_i - \bar{z})^2}{n}$ найти $p(\bar{z}/H2) = \frac{z_i}{\sigma^2(1+q)} e^{-\left(\frac{z_i^e}{2\sigma^2(1+q)}\right)} // Распределение Рэлея$ нарисовать_график $P_D(P_F)$ при $p_{F_0} = const = \varepsilon; q \in \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ конец

Рис. 1. Алгоритм нахождения зависимости правильного обнаружения сигнала от «ложных тревог»

Fig. 1. Algorithm for finding the dependence of correct signal detection from «false alarms»

Переменные в данном уравнении зависят как от технических характеристик самой подсистемы, так и от физических свойств окружающего пространства и характеристик зондирующего импульса. Известно, что с увеличением расстояния от объекта излучения, происходит рассеяние полезного сигнала и значительно уменьшается мощность уже пришедшего импульса на вход оптоэлектронной подсистемы. В этом случае довольно сложно выделить ве-

личину полезного импульса от общего шума. Но существует и другая проблема, возникающая при интерференции рассеянных импульсов, которая может привести к двум исходам: увеличению мощности импульса (за счет наложения волн) или полное угасание импульсов. Указанные ошибки являются непреднамеренными и должны также учитываться при задании порогового значения отношения сигнал/шум.

Сгенерируем статистические данные по мощности импульсов сигнала на основании приведенных ниже уравнений [32]:

$$P(r) = \frac{\chi P_0 A}{r^2} \frac{c\tau}{2} \beta(\lambda, r) T_1(r) T_2(r) \frac{\varphi_1}{\varphi_2}, \qquad (22)$$

где х – коэффициент оптических потерь;

r – расстояние до зондируемого объекта;

Р₀ – начальная мощность импульса; А – апертура приемника;



Т – длительность импульса;

T₁(r) – прозрачность атмосферы на пути от источника до зондируемого импульса;

T₂(r) – прозрачность атмосферы для обратного сигнала на его частоте;

 ϕ_1 – частота источника сигнала;

 ϕ_2 – частота обратного сигнала.

Представим сгенерированные данные в виде графиков и гистограмм на рис. 2 и 3 соответственно.

Результаты наблюдений при измерении скалярной компоненты представляют выборку из N величин: p₁, p₂, p₃,..., p_N, распределенных по закону, приближенному к Релею. По обеим гипотезам H1 и H2 измеряемые величины p_i – независимые, одинаково распределенные случайные величины с нулевыми средними. По гипотезе H1, каждая из величин имеет дисперсию σ_{01} , а по гипотезе H2, – дисперсию σ_{12} .



Рис. 2. Сгенерированные данные по мощности для гипотезы H2: а – данные мощности для N=1000; б – гистограмма данных наблюдений

Fig. 2. Generated power data for H2 hypothesis: a – power data for N=1000; 6 – histogram of observed data





Рис. 3. Сгенерированные данные мощности для гипотезы H1 (с шумовой составляющей для дальнейшего ее выделения): **a** – данные мощности для N=1000 с шумовой составляющей; **б** – гистограмма данных наблюдений

Fig. 3. Generated power data for H1 hypothesis (with a noise component for further isolation): \mathbf{a} – power data for *N*=1000 with a noise component; $\mathbf{6}$ – histogram of observed data

Построение графика зависимости рабочих характеристик лидара от выбранного ОСШ

Для цифровых оптоэлектронных систем существуют два основных метода приема информационных оптических сигналов (импульсов) фотоприемными устройствами: прямое фотодетектирование и гетеродинное фотодетектирование [33]. Отклик на пришедший импульс обуславливает возникновение определенной силы тока. В связи с этим, необходимо в пороговое значение отношения сигнал/шум внести третий показатель – дисперсию шумовой составляющей фотоприемника. Таким образом, пороговое значение отношения сигнал/шум будет рассчитываться по формуле

$$\varpi = \frac{\sigma_{01}^2}{\sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_{nf}^2}}.$$
 (23)

Оптимальный порог вероятности появления «ложной тревоги» приближенно равен [33]:

$$P_{\rm F} \approx 0.5 \cdot \left[1 - \Phi(\varpi/\sqrt{2})\right],\tag{24}$$

где $\Phi(z)$ – функция ошибок, вычисляемая по формуле

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx.$$
 (25)

На основании предложенной формулы (24) можно построить зависимость вероятности ошибки для разных пороговых значений отношения сигнал/шум. При этом зададим интервал вероятности появления ошибки схожим, что принимают в радиолокации от 10^{-6} до 10^{-3} (рис. 4).

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2022; 26(3): 129-150





Однако эта зависимость построена только для одного значения ОСШ ($\varpi =$ 3). Для построения множества таких зависимостей и обеспечить при этом значение методической ошибки моделирования $\delta_m = 10\%$ необходимо выполнить не менее $M = 10^8$ итераций обработки данных, с количеством наблюдений не менее N = 100 для каждой итерации. Требуемое количество итераций можно рассчитать следующим образом:

$$\frac{\sigma_{\varepsilon}}{P_{F0}} = \frac{\sqrt{1 - P_{F_0}}}{\sqrt{MP_{F_0}}},$$
(26)

где $\frac{\sigma_{\varepsilon}}{P_{F_0}} = \delta_m$ – относительная методическая ошибка, поэтому если $P_{F0} = 10^{-4}$, тогда $M \ge 10^8$.

Результаты и их обсуждение

Пример расчета принятой оптической мощности фотодетекторов лидара на основе выбранного порога ОСШ

Для проведения исследований с получением количественных значений перед разработчиками стоит задача найти некий компромисс между учетом инструментальных параметров и факторов внешней среды. Однако, как уже и говорилось ранее в статье, остается неясным, насколько каждый параметр подсистемы лидара и параметр подсистемы лидара и параметр окружающей среды могут количественно повлиять на конечные характеристики. В связи с этим, требуется изучить и провести оценку отношения сигнал/шум на вы-

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2022; 26(3): 129-150

ходе приемной подсистемы, состоящей из фотодетекторов. Указанная оценка является интегральным критерием эффективности.

Наиболее широко сегодня используются лидары, работающие в диапазоне длин волн, приближенных к 905 нм. В связи с этим, были рассмотрены типы фотодетекторов, у которых максимум чувствительности приходится на данную длину волны.

В качестве апробации были рассмотрены технические характеристики фотодетекторов одного из лидеров в производстве лидаров – компании «Velodyne». Эта фирма при изготовлении лидаров использует линейку фотодетекторов фирмы «First Sensor». Для сравнения также были взяты фотодетекторы, производимые фирмой «Hama-matsu» со схожими характеристиками. Ниже в табл. 1 приведены основные технические характеристики фотодетекторов, разрабатываемых фирмами «First Sensor» и «Hamamatsu» (при T = 23 °C).

Отношение мощности шумовой составляющей (интерференционного нало-жения) к мощности полученного сигнала составляет ~ 1/10, исходя из этого ОСШ будет в диапазоне 20-40 дБ [34]. Если перед разработчиком стоит задача обеспечить вероятность «ложной тревоги» 10^{-3} , и отношение сигнал/шум задано 30дБ, необходимо рассчитать принятую оптическую мощность приемного устройства лидара с вероятностью правильного обнаружения сигнала не ниже 0,95. Рассчитаем по формуле (22) мощность оптического сигнала исходя из приведенных технических характеристик в табл. 1. Смоделированные данные представлены на рис. 5 и 6 для двух различных сред с коэффициентами оптических потерь $\chi_1 = 0,1$ и $\chi_2 = 0,8$.

Таблица 1. Основные оптико-электронные характеристики

Параметр, единица из-	Значение параметра для фотодетектора / The value of the pa-			
мерения / Parameter, unit	rameter for the photodetector			
of measurement	«First Sensor»			«Hamamatsu»
	AD230-9 SMD	AD500-9	AD500-9-	S13773 и S15193
	и AD230-9 TO	SMD	400M TO5	
Активная площадь де-	0,04	0,196	0,196	0,5
тектора, мм ²				
Чувствительность, А/Вт	52; 58; 60 (три режима)			54; 64 (два режима)
Квантовая эффектив-	80	80	80	80
ность, %				
Максимальный постоян-	0,25	0,25	0,63	0,1; 0,3 (два режима)
ный ток, мА				
Темновой ток, нА	0,5	0,8	0,8	10

 Table 1. Main optoelectronic characteristics

Подход и алгоритм оценки допустимых значений отношения сигнал/шум ... 141



- **Рис. 5.** Зависимости принятой оптической мощности от расстояния и импульсной мощности лидара для трех видов детекторов (AD500, AD230 и S13773) в среде с коэффициентом оптических потерь χ₁ = 0,1
- Fig. 5. The dependence of the received optical power on the distance, and the pulse power of the LiDAR for three types of detectors (AD500, AD230, and S13773) in the media with $\chi_1 = 0.1$ optical loss factor

Полученные результаты моделирования показывают зависимость полученной оптической мощности от расстояния до объекта с учетом пиковой мощности передатчика лидара. В этом случае графическое представление основных параметров приемного устройства позволяет упростить принятие решения по выбору типа фотодетектора для конкретного лидара.

Мамченко М.В.

На рис. 5 и 6 видно, что вершины полученных оптических мощностей отличны по высоте для разных типов фотодетекторов. Это свидетельствует о том, что суммарно малые изменения характеристик вносят ощутимый вклад в общую составляющую основного параметра – полученная оптическая мощность. Большое отличие в значениях по мощности имеет тип фотодетектора AD500-9 SMD, соответственно данного типа выделить полезный сигнал на фоне шумов будет проще.

Приведенный расчет полученной оптической мощности дополняет ход действий при использовании подхода, описанного в статье. Ведь исходя из фиксированного значения «ложной тревоги» и полученного графического выражения рабочей характеристики (на рис. 4) становится возможно подобрать лидар с необходимыми техническими параметрами [35].



- Рис. 6. Зависимости принятой оптической мощности от расстояния и импульсной мощности лидара для трех видов детекторов (AD500, AD230 и S13773) в среде с коэффициентом оптических потерь χ₂ = 0,8
- Fig. 6. The dependence of the received optical power on the distance, and the pulse power of the LiDAR for three types of detectors (AD500, AD230, and S13773) in the media with $\chi_2 = 0.8$ optical loss factor

Обсуждение

Сформированные и представленные в работе зависимости могут использоваться в качестве одной из эксплуатационных характеристик при разработке и выборе оптоэлектронной подсистемы измерения лидаров. На графике зависимости некоторой рабочей характеристики фотодетектора выбирается ряд значений, соответствующих фиксированным пороговым значениям. Тип этой характеристики будет определяться моделью импульсной передачи мощности в пространстве, уровнем шума и помех, техническими характеристиками лидара, наличием случайных составляющих в обнаруженном сигнале и т.д. Данная эксплуатационная характеристика позволяет определить вероятность правильного обнаружения И «ложной тревоги» в зависимости от выбранного критерия оптимальности. В настоящей работе рассмотрена одна эксплуатационная характеристика, в то время как на практике для правильного выбора режима работы лидара необходимо формировать набор схожих характеристик для различных пороговых значений ОСШ. Использование множества характеристик важно тем, что в случае наличия только одной характеристики неправильный выбор области наблюдения с тем же значением вероятности «ложной тревоги» может привести к значительному снижению вероятности правильного обнаружения лидара.

При проведении расчетов предполагается, что приходит полезный сигнал совместно с интерференционной составляющей (шумовая составляющая). Отношение сигнал/шум на входе оптоэлектронной подсистемы (по мощности) находится в диапазоне от 10^{-6} до 10⁻⁴. В соответствии со статистическими характеристиками сигналов выполнялось моделирование выходного и входного сигнала для определенной выборки *N*. Для построения гистограммы, аппроксимирующей плотность вероятности выходных процессов, расчет повторялся 1000 раз для двух гипотез: когда на входе присутствует только шум (гипотеза H1) и когда принимается полезный сигнал от локального источника (гипотеза Н2). Полученные гистограммы, аппроксимирующие плотность вероятностей при приеме шума и при приеме полезного сигнала на фоне шума, позволили рассчитать вероятность ложной тревоги и вероятность правильного обнаружения. Согласно критерию Неймана-Пирсона выбирается такое правило обнаружения, которое обеспечивает минимальную величину пропуска объекта (максимальную вероятность правильного обнаружения) при условии, что вероятность ложной тревоги не превышает заданной величины.

Вместе с тем, предложенный подход обладает рядом недостатков, присущих в силу соответствующих ограничений применимости:

 не учитывается качество облака точек, а стабилизируется значение вероятности появления ложной тревоги по отношению к максимальной вероятности правильного срабатывания. Вероятность появления ложного события в каждый момент времени не известна, поэтому возможно применение критерия Неймана-Пирсона при построении выбора решения;

 – составные элементы (источники)
 неопределенности от различных подсистем лидара не выявлялись и не описывались; вместо этого была представлена только оценка общей составляющей ошибки;

количественно ошибки, возника ющие из-за шумовых составляющих
 окружающей среды, по отдельности не
 учитывались; вместо этого учитывался
 их общий вклад в фоновую ошибку.

 при апробации данного подхода
 были взяты идеализированные параметры окружающей среды (нормальные условия эксплуатации лидара) и не учитывались фоновые изменения окружающей среды.

В дальнейших исследованиях предполагается совершенствование представленного подхода за счет учета фонового шума, возникающего из-за солнечного излучения в ясную погоду, а также учет других распределений шума при условии наличия аналитического выражения для установленного распределения вероятности «ложной тревоги».

Выводы

Разработан вероятностный подход и соответствующий алгоритм выбора

порогового значения ОСШ, основанный на сущности критерия Неймана-Пирсона. Подход позволяет минимизировать значение вероятности «игнорирования» объекта при сканировании за счет недопущения превышения вероятности «ложной тревоги» заданного порогового значения. Представлено математическое и методологическое обеспечение для проектирования лидаров с учетом априорной оценки допустимого значения ОСШ и вероятности обнаружения отраженного импульса, без учета предварительных оценок вероятностных характеристик обнаружения объектов лидаром. Математическое описание шумовой составляющей фотодетектора рассматривает непреднамеренное влияние как ошибку, вызванную интерференцией. Стоит отметить, что предлагаемый подход учитывает только функцию плотности шума в соответствии с распределением Рэлея. В представленном алгоритме на вход подается набор необработанных данных – в виде значений полученного сигнала с шумовой составляющей. Выходные данные представлены множеством зависимостей вероятности ошибок для различных пороговых значений отношения сигнал/шум.

Список литературы

1. Heinzler R., Schindler P., Seekircher J., Ritter W., Stork W. Weather Influence and Classification with Automotive Lidar Sensors. *Proceedings of the 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2019; 1527–1534. https://doi.org/: 10.1109/IVS.2019.8814205.

2. Lin S.-L., Wu B.-H. Application of Kalman Filter to Improve 3D LiDAR Signals of Autonomous Vehicles in Adverse Weather. *Applied Sciences*. 2021; 11(7:3018): 1–16. https://doi.org/10.3390/app11073018.

3. Charron N., Phillips S., Waslander S.L. De-noising of Lidar Point Clouds Corrupted by Snowfall. *Proceedings of the 2018 15th Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*. 2018; 254–261. https://doi.org/10.1109/CRV.2018.00043.

4. Changalvala R., Malik H. LiDAR Data Integrity Verification for Autonomous Vehicle. *IEEE Access.* 2019; 7: 138018–138031. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2943207.

5. Shin H., Kim D., Kwon Y., Kim Y. Illusion and Dazzle: Adversarial Optical Channel Exploits against Lidars for Automotive Applications. *Lecture Notes in Computer Science*. 2017; 10529: 445–467. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66787-4_22.

6. Hwang I.-P., Yun S.-j., Lee C.-H. Study on the Frequency-Modulated Continuous-Wave LiDAR Mutual Interference. *Proceedings of the 2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*. 2019; 1053–1056. https://doi.org/10.1109/ ICCT46805.2019.8947067.

7. Godbaz J.P., Dorrington A.A., Cree M.J. Understanding and Ameliorating Mixed Pixels and Multipath Interference in AMCW Lidar. *TOF Range-Imaging Cameras*. 2013; 91–116. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27523-4_5.

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2022; 26(3): 129-150

8. Kim G., Eom J., Hur S., Park Y. Analysis on the characteristics of mutual interference between pulsed terrestrial LIDAR scanners. *Proceedings of the 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2015; 2151–2154. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326229.

9. Kim G., Eom J., Park S., Park Y. Occurrence and characteristics of mutual interference between LIDAR scanners. *Photon Counting Applications. Proceedings*. 2015; 9504: 1–9. https://doi.org/10.1117/12.2178502.

10. Kim G., Eom J., Park Y. Investigation on the occurrence of mutual interference between pulsed terrestrial LIDAR scanners. *Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV).* 2015; 437–442. https://doi.org/10.1109/IVS.2015.7225724.

11. Eom J., Kim G., Hur S., Park Y. Assessment of Mutual Interference Potential and Impact with off-the-Shelf Mobile LIDAR. *Advanced Photonics 2018 (BGPP, IPR, NP, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF)*. 2018; (JTu2A.66): 1–14. ttps://doi.org/10.1364/BGPPM.2018.JTu2A.66.

12. Park Y., Kim G., Eom J. Design of pulsed scanning lidar without mutual interferences. *Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits XX. Proceedings.* 2018; 10536: 1–6. https://doi.org/10.1117/12.2288740.

13. Popko G.B., Gaylord T.K., Valenta C.R. Geometric approximation model of interlidar interference. *Optical Engineering*. 2020; 59(3:033104): 1–21. https://doi.org/10.1117/ 1.OE.59.3.033104.

14. Zhang F., Du P., Liu Q., Gong M., Fu X. Adaptive strategy for CPPM single-photon collision avoidance LIDAR against dynamic crosstalk. *Optics Express*. 2017; 25(11): 12237–12250. https://doi.org/10.1364/OE.25.012237.

15. Diehm A.L., Hammer M., Hebel M., Arens M. Mitigation of crosstalk effects in multi-LiDAR configurations. *Electro-Optical Remote Sensing XII. Proceedings.* 2018; 10796(1079604): 1–12. https://doi.org/10.1117/12.2324305.

16. Wu J., Xu H., Tian Y., Pi R., Yue R. Vehicle Detection under Adverse Weather from Roadside LiDAR Data. *Sensors*. 2020; 20(12:3433): 1–17. https://doi.org/10.3390/s20123433.

17. Kutila M., Pyykönen P., Ritter W., Sawade O., Schäufele B. Automotive LIDAR sensor development scenarios for harsh weather conditions. *Proceedings of the 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2016; 265–270. https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795565.

18. Jokela M., Pyykönen P., Kutila M., Kauvo K. LiDAR Performance Review in Arctic Conditions. *Proceedings of the 2019 IEEE 15th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*. 2019; 27–31. https://doi.org/10.1109/ICCP48234.2019.8959554.

19. Park J.-I., Park J., Kim K.-S. Fast and Accurate Desnowing Algorithm for LiDAR Point Clouds. *IEEE Access.* 2020; 8: 160202–160212. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020266.

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2022; 26(3): 129-150

20. Ronen A., Agassi E., Yaron O. Sensing with Polarized LIDAR in Degraded Visibility Conditions Due to Fog and Low Clouds. *Sensors*. 2021; 21(7:2510): 1–13. https://doi.org/10.3390/s21072510.

21. Vargas Rivero J.R., Gerbich T., Buschardt B., Chen J. Data Augmentation of Automotive LIDAR Point Clouds under Adverse Weather Situations. *Sensors*. 2021; 21(13:4503): 1–16. https://doi.org/10.3390/s21134503.

22. Chen Y., Xie Y., Liu C., Chen L. Investigation of Anti-Interference Characteristics of Frequency-Hopping LiDAR. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2021; 33(24): 1443–1446. https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3125702.

23. Yu M., Shi M., Hu W., Yi L. FPGA-Based Dual-Pulse Anti-Interference Lidar System Using Digital Chaotic Pulse Position Modulation. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2021; 33(15): 757–760. https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3093109.

24. Seo H., Cho G., Kim J., Bae J., Kim S.-J., Chun J.-H., Choi J. A CMOS LiDAR Sensor with Pre-Post Weighted-Histogramming for Sunlight Immunity over 105 klx and SPAD-based Infinite Interference Canceling. *Proceedings of the 2021 Symposium on VLSI Circuits*. 2021; 1–2. https://doi.org/10.23919/VLSICircuits52068.2021.9492328.

25. Tsai C.-M., Liu Y.C. Anti-Interference Single-Photon LiDAR Using Stochastic Pulse Position Modulation. *Optics Letters*. 2020; 45(2): 439–442. https://doi.org/ 10.1364/OL.384894.

26. Ishizaki Y., Zhang C., Set S.Y., Yamashita S. A Novel Software-Based Optical Sampling Scheme for High-Precision and Interference-Free Time-of-Flight LiDAR. *Proceedings of the 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. 2020; 1–2.

27. Fersch T., Weigel R., Koelpin A. A CDMA Modulation Technique for Automotive Time-of-Flight LiDAR Systems. *IEEE Sensors Journal*. 2017; 17(11): 3507–3516. https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2688126.

28. Cheng C.-H., Chen C.-Y., Chen J.-D., Pan D.-K., Ting K.-T., Lin F.-Y. 3D pulsed chaos lidar system. *Optics Express.* 2018; 26(9): 12230–12241. https://doi.org/ 10.1364/OE.26.012230.

29. Matsumura R., Sugawara T., Sakiyama K. A Secure LIDAR with AES-based Side-Channel Fingerprinting. 2018 Sixth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW). 2018; 479–482. https://doi.org/10.1109/CANDARW.2018.00092.

30. Takefuji Y. Connected Vehicle Security Vulnerabilities [Commentary]. *IEEE Technology and Society Magazine*. 2018; 37(1): 15–18. https://doi.org/10.1109/ MTS.2018.2795093.

31. Boreysho A.S., Kim A.A., Konyaev M.A., Luginya V.S., Morozov A.V., Orlov A.E. Modern Lidar Systems for Atmosphere Remote Sensing. *PHOTONICS RUSSIA*. 2019; 7(13): 648–657. https://doi.org/10.22184/1992-7296.FRos.2019.13.7.648.657

32. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987.

33. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения: в 2 т. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012. Т. 2.

34. Hwang I.-P., Lee C.-H. Mutual Interferences of a True-Random LiDAR with Other LiDAR Signals. *IEEE Access.* 2020; 8: 124123–124133. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3004891.

35. Meshcheryakov R., Iskhakov A., Mamchenko M., Romanova M., Uvaysov S., Amirgaliyev Y., Gromaszek K. A Probabilistic Approach to Estimating Allowed SNR Values for Automotive LiDARs in "Smart Cities" under Various External Influences. *Sensors*. 2022; 22(2:609): 1–31. https://doi.org/10.3390/s22020609.

References

1. Heinzler R., Schindler P., Seekircher J., Ritter W., Stork W. Weather Influence and Classification with Automotive Lidar Sensors. *Proceedings of the 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2019; 1527–1534. https://doi.org/: 10.1109/IVS.2019.8814205.

2. Lin S.-L., Wu B.-H. Application of Kalman Filter to Improve 3D LiDAR Signals of Autonomous Vehicles in Adverse Weather. *Applied Sciences*. 2021; 11(7:3018): 1–16. https://doi.org/10.3390/app11073018.

3. Charron N., Phillips S., Waslander S.L. De-noising of Lidar Point Clouds Corrupted by Snowfall. *Proceedings of the 2018 15th Conference on Computer and Robot Vision* (*CRV*). 2018; 254–261. https://doi.org/10.1109/CRV.2018.00043.

4. Changalvala R., Malik H. LiDAR Data Integrity Verification for Autonomous Vehicle. *IEEE Access.* 2019; 7: 138018–138031. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2943207.

5. Shin H., Kim D., Kwon Y., Kim Y. Illusion and Dazzle: Adversarial Optical Channel Exploits against Lidars for Automotive Applications. *Lecture Notes in Computer Science*. 2017; 10529: 445–467. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66787-4 22.

6. Hwang I.-P., Yun S.-j., Lee C.-H. Study on the Frequency-Modulated Continuous-Wave LiDAR Mutual Interference. *Proceedings of the 2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*. 2019; 1053–1056. https://doi.org/10.1109/ ICCT46805.2019.8947067.

7. Godbaz J.P., Dorrington A.A., Cree M.J. Understanding and Ameliorating Mixed Pixels and Multipath Interference in AMCW Lidar. *TOF Range-Imaging Cameras*. 2013; 91–116. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27523-4_5.

8. Kim G., Eom J., Hur S., Park Y. Analysis on the characteristics of mutual interference between pulsed terrestrial LIDAR scanners. *Proceedings of the 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2015; 2151–2154. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326229.

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2022; 26(3): 129-150

9. Kim G., Eom J., Park S., Park Y. Occurrence and characteristics of mutual interference between LIDAR scanners. *Photon Counting Applications. Proceedings*. 2015; 9504: 1–9. https://doi.org/10.1117/12.2178502.

10. Kim G., Eom J., Park Y. Investigation on the occurrence of mutual interference between pulsed terrestrial LIDAR scanners. *Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV).* 2015; 437–442. https://doi.org/10.1109/IVS.2015.7225724.

11. Eom J., Kim G., Hur S., Park Y. Assessment of Mutual Interference Potential and Impact with off-the-Shelf Mobile LIDAR. *Advanced Photonics 2018 (BGPP, IPR, NP, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF)*. 2018; (JTu2A.66): 1–14. ttps://doi.org/ 10.1364/BGPPM.2018.JTu2A.66.

12. Park Y., Kim G., Eom J. Design of pulsed scanning lidar without mutual interferences. *Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits XX. Proceedings.* 2018; 10536: 1–6. https://doi.org/10.1117/12.2288740.

13. Popko G.B., Gaylord T.K., Valenta C.R. Geometric approximation model of interlidar interference. *Optical Engineering*. 2020; 59(3:033104): 1–21. https://doi.org/10.1117/ 1.OE.59.3.033104.

14. Zhang F., Du P., Liu Q., Gong M., Fu X. Adaptive strategy for CPPM single-photon collision avoidance LIDAR against dynamic crosstalk. *Optics Express*. 2017; 25(11): 12237–12250. https://doi.org/10.1364/OE.25.012237.

15. Diehm A.L., Hammer M., Hebel M., Arens M. Mitigation of crosstalk effects in multi-LiDAR configurations. *Electro-Optical Remote Sensing XII. Proceedings.* 2018; 10796(1079604): 1–12. https://doi.org/10.1117/12.2324305.

16. Wu J., Xu H., Tian Y., Pi R., Yue R. Vehicle Detection under Adverse Weather from Roadside LiDAR Data. *Sensors*. 2020; 20(12:3433): 1–17. https://doi.org/10.3390/s20123433.

17. Kutila M., Pyykönen P., Ritter W., Sawade O., Schäufele B. Automotive LIDAR sensor development scenarios for harsh weather conditions. *Proceedings of the 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2016; 265–270. https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795565.

18. Jokela M., Pyykönen P., Kutila M., Kauvo K. LiDAR Performance Review in Arctic Conditions. *Proceedings of the 2019 IEEE 15th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*. 2019; 27–31. https://doi.org/10.1109/ICCP48234.2019.8959554.

19. Park J.-I., Park J., Kim K.-S. Fast and Accurate Desnowing Algorithm for LiDAR Point Clouds. *IEEE Access.* 2020; 8: 160202–160212. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020266.

20. Ronen A., Agassi E., Yaron O. Sensing with Polarized LIDAR in Degraded Visibility Conditions Due to Fog and Low Clouds. *Sensors.* 2021; 21(7:2510): 1–13. https://doi.org/10.3390/s21072510.

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2022; 26(3): 129-150

21. Vargas Rivero J.R., Gerbich T., Buschardt B., Chen J. Data Augmentation of Automotive LIDAR Point Clouds under Adverse Weather Situations. *Sensors*. 2021; 21(13:4503): 1–16. https://doi.org/10.3390/s21134503.

22. Chen Y., Xie Y., Liu C., Chen L. Investigation of Anti-Interference Characteristics of Frequency-Hopping LiDAR. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2021; 33(24): 1443–1446. https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3125702.

23. Yu M., Shi M., Hu W., Yi L. FPGA-Based Dual-Pulse Anti-Interference Lidar System Using Digital Chaotic Pulse Position Modulation. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2021; 33(15): 757–760. https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3093109.

24. Seo H., Cho G., Kim J., Bae J., Kim S.-J., Chun J.-H., Choi J. A CMOS LiDAR Sensor with Pre-Post Weighted-Histogramming for Sunlight Immunity over 105 klx and SPAD-based Infinite Interference Canceling. *Proceedings of the 2021 Symposium on VLSI Circuits*. 2021; 1–2. https://doi.org/10.23919/VLSICircuits52068.2021.9492328.

25. Tsai C.-M., Liu Y.C. Anti-Interference Single-Photon LiDAR Using Stochastic Pulse Position Modulation. *Optics Letters*. 2020; 45(2): 439–442. https://doi.org/ 10.1364/OL.384894.

26. Ishizaki Y., Zhang C., Set S.Y., Yamashita S. A Novel Software-Based Optical Sampling Scheme for High-Precision and Interference-Free Time-of-Flight LiDAR. *Proceedings of the 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. 2020; 1–2.

27. Fersch T., Weigel R., Koelpin A. A CDMA Modulation Technique for Automotive Time-of-Flight LiDAR Systems. *IEEE Sensors Journal*. 2017; 17(11): 3507–3516. https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2688126.

28. Cheng C.-H., Chen C.-Y., Chen J.-D., Pan D.-K., Ting K.-T., Lin F.-Y. 3D pulsed chaos lidar system. *Optics Express*. 2018; 26(9): 12230–12241. https://doi.org/10.1364/OE.26.012230.

29. Matsumura R., Sugawara T., Sakiyama K. A Secure LIDAR with AES-based Side-Channel Fingerprinting. 2018 Sixth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW). 2018; 479–482. https://doi.org/10.1109/CANDARW.2018.00092.

30. Takefuji Y. Connected Vehicle Security Vulnerabilities [Commentary]. *IEEE Technology and Society Magazine*. 2018; 37(1): 15–18. https://doi.org/10.1109/MTS.2018.2795093.

31. Boreysho A.S., Kim A.A., Konyaev M.A., Luginya V.S., Morozov A.V., Orlov A.E. Modern Lidar Systems for Atmosphere Remote Sensing. *PHOTONICS RUSSIA*. 2019; 7(13): 648–657. https://doi.org/10.22184/1992-7296.FRos.2019.13.7.648.657

32. Mejeris R. *Lazernoe distantsionnoe zondirovanie* [Remote laser sensing]. Moscow, Mir Publ., 1987.

33. Saleh B., Teih M. *Optika i fotonika. Printsipy i primeneniya* [Optics and photonics. Principles and applications] Dolgoprudny, 2012. Vol. 2.

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2022; 26(3): 129-150

34. Hwang I.-P., Lee C.-H. Mutual Interferences of a True-Random LiDAR with Other LiDAR Signals. *IEEE Access.* 2020; 8: 124123–124133. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3004891.

35. Meshcheryakov R., Iskhakov A., Mamchenko M., Romanova M., Uvaysov S., Amirgaliyev Y., Gromaszek K. A Probabilistic Approach to Estimating Allowed SNR Values for Automotive LiDARs in "Smart Cities" under Various External Influences. *Sensors*. 2022; 22(2:609): 1–31. https://doi.org/10.3390/s22020609.

Информация об авторе / Information about the Author

Мамченко Марк Владиславович, научный сотрудник лаборатории киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: markmamcha@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6366-9786

Mark V. Mamchenko, Researcher,

Cyberphysical Systems Lab., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: markmamcha@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6366-9786