

АДАПТИВНЫЕ МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРНЫХ УСТРОЙСТВ

Введение

Одной из отличительных особенностей современного этапа развития лазерных дальномерных устройств является их миниатюризация и широкая интеграция в различные роботизированные радиотехнические системы и дистанционные системы автоматического управления [1]. К таким системам относятся мобильные трехмерные сканеры, роботизированные навигационные платформы, различные устройства автоматической стыковки объектов, бортовые приборы картографирования местности, многофункциональные дистанционные измерители промышленного и военного назначения.

Эти системы осуществляют высокоскоростные измерения расстояния в условиях динамического изменения пространственного положения протяженных объектов с локально неоднородной неплоской поверхностью и значительных вариаций уровня фонового излучения, что вызывает существенные флуктуации амплитуды и искажения формы принимаемых сигналов. Это приводит к уменьшению отношения сигнал/шум и случайному сдвигу момента срабатывания компараторов, что обуславливает появление значительных ошибок измерения временного интервала между излученным и принятым от объекта импульсом [2].

Существующие методы снижения таких ошибок эффективны лишь в линейной области изменения сигнала и, как правило, в достаточно ограниченном динамическом диапазоне. При нелинейных искажениях сигнала, обусловленных перегрузками приемного тракта, эти методы становятся непригодными. Кроме этого, наличие шумов и помех аддитивного и мультипликативного характера приводит к возрастанию измерительных ошибок, а в некоторых случаях к неустойчивой работе приемного тракта [3].

В связи с этим возникает актуальная задача адаптации параметров лазерного дальномерного устройства (ЛДУ) к изменяющимся внешним условиям и разработки эффективных методов компенсации ошибок измерения.

Цель работы – исследование адаптивных методов компенсации ошибок измерений и обеспечения устойчивого функционирования ЛДУ в условиях динамических изменений параметров принимаемого сигнала и шума.

Моделирование методов компенсации ошибок измерений ЛДУ

Задача компенсации ошибок измерений и обеспечения устойчивой работы ЛДУ решалась путем реализации методов адаптивного управления параметрами приемного тракта в соответствии с изменяющимися внешними условиями и динамической коррекции измеренных данных с помощью специальных поправок. Эти поправки формировались на основе оценки ошибок измерения дальности до объекта при различных амплитудах принятого сигнала или при различных длительностях принятого сигнала в режиме насыщения усиления. Для этого в каждом рабочем цикле измерялись текущие значения амплитуды или длительности принятого сигнала в режиме ограничения амплитуды при насыщении усиления. Кроме этого осуществлялись измерения текущего уровня шума приемного тракта для регулировки напряжения и, соответственно, усиления лавинного фотодиода (ЛФД) и установки адаптивного порога. При этом коррекционные поправки оценивались для всего диапазона изменения уровня адаптивного порога.

В ходе исследований было установлено, что максимальная эффективность адаптивного процесса достигалась при комплексном использовании следующих методов:

- адаптивного управления усилением ЛФД для обеспечения устойчивых измерений в условиях оптических помех и динамического возрастания уровня фона;
- формирования адаптивного порога для повышения чувствительности приемного канала и обеспечения максимальной дальности действия ЛДУ в условиях умеренного и слабого фона;
- фиксации временного положения принятого импульса по переднему фронту для устранения зависимости ошибок измерений от длительности импульса;
- динамической коррекции результатов измерений для компенсации ошибок, обусловленных флуктуациями амплитуды принятых импульсов;
- динамической коррекции результатов измерений для компенсации ошибок, обусловленных искажениями формы принятых импульсов при ограничении амплитуды в режиме насыщения усиления.

Для исследования эффективности этих методов была разработана имитационная модель ЛДУ (рис.1).

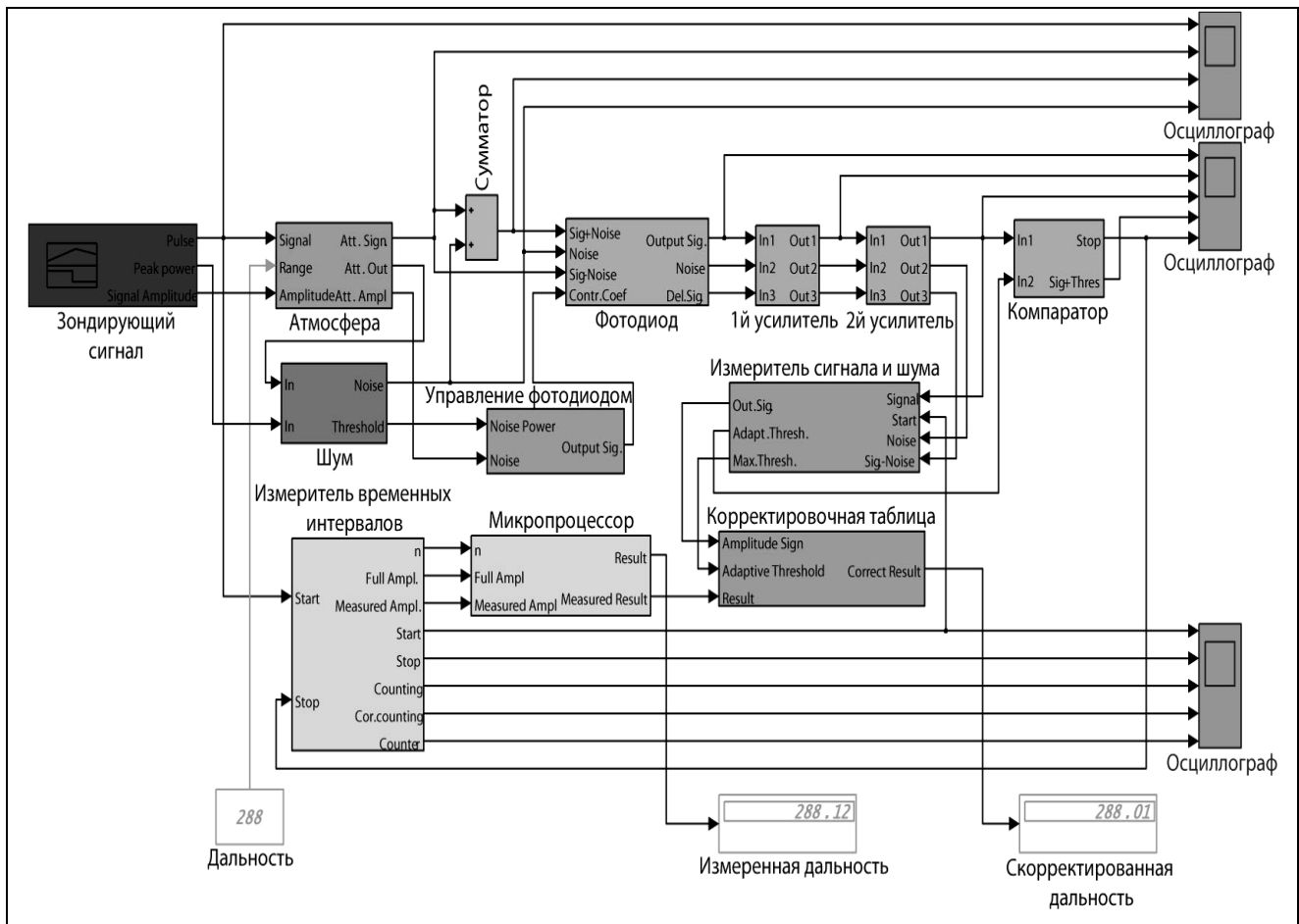


Рис. 1. Имитационная модель ЛДУ

Состав и функции блоков имитационной модели представлены в табл. 1.

Таблица 1

N	Название блока	Функции
1.	Блок «Зондирующий сигнал»	Формирование зондирующего (СТАРТ) сигнала с заданными параметрами
2.	Блок «Атмосфера»	Реализация атмосферного ослабления и турбулентного искажения сигнала
3.	Блок «Шум»	Формирование шумового сигнала
4.	Блок «Дальность»	Установка исходной дальности
5.	Блок «Сумматор»	Формирование смеси сигнала и шума
6.	Блок «Фотодиод»	Формирование тока фотодиода
7.	Блок «Управление фотодиодом»	Адаптивное управление усилением ЛФД
8.	Блок «Усилитель 1»	Преобразование и усиление сигнала
9.	Блок «Усилитель 2»	Усиление сигнала
10.	Блок «Измеритель сигнала и шума»	Измерение амплитуды и длительности сигнала и СКО шума
11.	Блок «Компаратор»	Формирование СТОП импульса
12.	Блок «Измеритель временных интервалов»	Измерение временных интервалов между СТАРТ и СТОП сигналами
13.	Блок «Микропроцессор»	Вычисление значений дальности
14.	Блок «Корректировочная таблица»	Компенсация ошибок, обусловленных флуктуациями амплитуды и искажениями формы импульсов
15.	Блок «Измеренная дальность»	Индикация значения измеренной дальности
16.	Блок «Скорректированная дальность»	Индикация значения скорректированной дальности
17.	Блоки «Осциллограф»	Визуализация выходных сигналов блоков

Основой для разработки имитационной модели ЛДУ стали математическая модель процесса формирования измерительного сигнала и структура построения лазерных измерительных систем [4]. Имитационная модель ЛДУ была синтезирована в программной системе MATLAB. Она представляет собой совокупность блоков, объединенных общим алгоритмом функционирования ЛДУ. Блоки характеризуются высоким уровнем интеграции и реализуют математический аппарат, описывающий процесс преобразования сигнала каждым элементом измерительного тракта. При этом все преобразования сигнала осуществляются во временной области с учетом реальных характеристик элементов и особенностей их функционирования. Используемые в модели ограничения и допущения соответствуют реальным условиям и режимам работы лазерных измерительных систем на атмосферных трассах и конкретным ограниченными диапазонами изменения параметров элементной базы.

Задачами исследования было моделирование флуктуаций параметров сигнала и шума, приводящих к ошибкам измерений, и дальнейшая оценка эффективности методов динамической компенсации этих ошибок. Флуктуации амплитуды моделировались случайными изменениями значений спектрального коэффициента отражения объекта и угла между направлением лазерного пучка и нормалью к локальному участку поверхности объекта. Искажения моделировались изменениями формы импульса и увеличением длительности ограниченного по амплитуде импульса в режиме насыщения усиления. Исследования модели проводились как для постоянного, так и для адаптивного порога срабатывания компаратора. Уровень постоянного порога был выбран из наихудших фоновых условий для снижения вероятности ложных срабатываний. При этом значение спектральной плотности фонового излучения соответствовало дневным солнечным безоблачным условиям.

Для обеспечения устойчивой работы ЛДУ в условиях существенных динамических вариаций уровня шума в модели было реализовано адаптивное управление усилением ЛФД.

В случае превышения уровнем шума граничного значения, при котором могут происходить ложные срабатывания компаратора, коэффициент управления усилением уменьшался в соответствии с выражением

$$K(U_{iш}) = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{iш} < U_{зр} \\ K_i, & \text{если } U_{iш} \geq U_{зр} \end{cases}, \quad (1)$$

где $K(U_{iш})$ – коэффициент управления усилением ЛФД, зависящий от амплитуды шумового напряжения; $U_{iш}$ – текущее значение амплитуды шумового напряжения; $U_{зр}$ – граничное значение шумового напряжения; $K_i < 1$ – коэффициент управления усилением.

Граничное значение шумового напряжения определялось для наилучших внешних условий и рассчитывалось в соответствии с выражением

$$U_{зр} = q(D, F) \cdot \sigma_{ш}, \quad (2)$$

где $q(D, F)$ – отношение сигнал/шум, определяемое заданными значениями вероятностей правильного обнаружения (D) и ложной тревоги (F); $\sigma_{ш}$ – СКО шума:

$$\sigma_{ш} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (U_{iш} - m_{ш})^2}, \quad (3)$$

где n – количество выборок; $m_{ш}$ – МОЖ шума.

При этом коэффициент управления усилением ЛФД в случае превышения шумом граничного значения оценивался соотношением

$$K_i = \frac{U_{зр}}{U_{iш}}, \quad (4)$$

Зависимость коэффициента управления усилением от уровня шума была построена из условия поддержания заданной величины шума, не превышающей граничного значения (200 мВ). Результаты оценки коэффициента управления усилением ЛФД для различных значений напряжения шума представлены в табл. 2.

Таблица 2

$U_{iш}$, мВ	K_i
200	1
225	0.89
250	0.80
275	0.72
300	0.66
325	0.61
350	0.57

Анализ результатов исследования показал, что использование адаптивного управления усилением ЛФД позволяет устранить возможность превышения граничного значения напряжения шума и, тем самым, обеспечить устойчивую работу ЛДУ в условиях динамического возрастания уровня шума или присутствия оптических помех.

Для повышения чувствительности приемного канала и обеспечения максимальной дальности действия ЛДУ в условиях умеренного и слабого фона в модели осуществлялось формирование адаптивного порога в соответствии с выражением

$$U_{пор}^A(t) = [P_{ш} \cdot n(t) \cdot \varepsilon_{\lambda} \cdot M \cdot K(U_{iш}) \cdot z \cdot k_2 \cdot q(D, F)] \otimes h_d(t), \quad (5)$$

где $P_{ш}$ – суммарная средняя мощность всех составляющих шума; $n(t)$ – нормальный белый шум с нулевым средним и единичной дисперсией; ε_{λ} – спектральная чувствительность ЛФД; M – коэффициент умножения ЛФД; z – импеданс первого усилителя; k_2 – коэффициент усиления второго усилителя; h_d – импульсная характеристика пикового детектора.

Результаты оценки максимальной дальности действия ОДУ при использовании постоянного и адаптивного порогов для различных значений уровня фона представлены в табл. 3.

Таблица 3

Спектральная плотность мощности фона, $Вт/(см^2 \cdot мкм)$	Максимальная дальность (постоянный порог 216,4 мВ), м	Максимальная дальность (адаптивный порог), м
0.025	291.67	426.03
0.050	291.67	377.82
0.075	291.67	344.28
0.100	291.67	319.04
0.125	291.67	304.79
0.150	291.67	292.56

Анализ результатов исследования показал, что в условиях значительного уровня фона значения максимальной дальности действия ЛДУ с постоянным и адаптивным порогом практически совпадают. В условиях умеренного и слабого фона максимальная дальность действия ЛДУ с адаптивным порогом значительно возрастает.

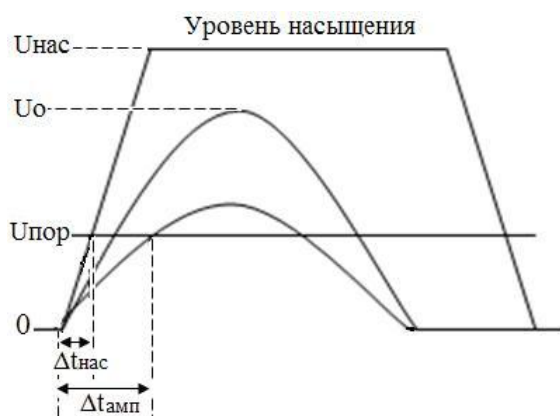


Рис. 2. Ошибки измерений ЛДУ

Адаптивные методы компенсации ошибок измерения ЛДУ были реализованы с помощью динамической коррекции результатов измерения дальности на основе оценок текущих значений полученных ошибок. При фиксации импульса по переднему фронту в условиях значительных флуктуаций амплитуды и нелинейных искажений формы доминируют два вида ошибок (рис. 2): ошибки измерения ($\Delta t_{амп}$), обусловленные флуктуациями амплитуды импульсов; ошибки измерения ($\Delta t_{нас}$), обусловленные искажениями формы импульсов в режиме насыщения усиления.

При этом очевидно, что каждому значению амплитуды или длительности импульса в режиме насыщения усиления соответствует своя определенная ошибка измерений. Поэтому для оценки ошибок измерения и, соответственно, формирования поправок для их компенсации достаточно измерять текущее значение амплитуды импульса или его длительности в режиме ограничения амплитуды при насыщении усиления, а также величину адаптивного порога.

При использовании в модели колоколообразного сигнала ошибки измерений, обусловленные флуктуациями амплитуды, оценивались из условия пересечения сигналом уровня порогового напряжения:

$$U_0 \cdot \exp\left[-\frac{t^2}{2 \cdot \tau_n^2}\right] = U_{пор}, \quad (6)$$

где U_0 – амплитуда импульса; τ_n – длительность импульса на половине амплитуды; $U_{пор}$ – пороговое напряжение.

В этом случае ошибка измерений, обусловленная флуктуациями амплитуды импульсов, оценивалась соотношением

$$\Delta t_{амп} = t_o - \tau_n \cdot \sqrt{2 \cdot \ln \left(\frac{U_o}{U_{пор}} \right)}, \quad (7)$$

где t_o – половина полной длительности импульса.

Ограничение сигнала по амплитуде в режиме насыщения усиления обусловлено большими входными сигналами. Для таких сигналов время нарастания переднего фронта ограничено конечной полосой пропускания приемного канала. В этом случае ошибка измерений ЛДУ может быть определена из следующего условия:

$$U_{нас} \cdot \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_{пр}} \right) \right] = U_{пор}, \quad (8)$$

где $U_{нас}$ – величина напряжения насыщения; $\tau_{пр}$ – постоянная времени приемного канала.

Тогда ошибки измерений, обусловленные искажением формы сигнала в режиме насыщения усиления, с учетом закона сохранения энергии можно оценить выражением

$$\Delta t_{нас} = \tau_{пр} \cdot \ln \left(\frac{U_{нас} \cdot \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}}}{U_{нас} \cdot \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}} - U_{пор}} \right), \quad (9)$$

где τ_1, τ_2 – длительности зондирующего и ограниченного по амплитуде импульсов соответственно.

На основании оценок ошибок измерений строились корректировочные кривые с аппроксимацией кусочно-линейными функциями для дальнейшей динамической компенсации этих ошибок в реальном масштабе времени.

Тогда значение скорректированной дальности при компенсации ошибок, обусловленных флуктуациями амплитуды импульса, оценивается соотношением

$$R_{кор} = R_{изм} - \left(\frac{c}{2} \cdot \Delta t_{амп} \right), \quad (10)$$

где $R_{кор}$ – скорректированная дальность; $R_{изм}$ – текущее значение измеренной дальности; c – скорость света.

Скорректированная дальность при компенсации ошибок, обусловленных искажениями формы импульса в режиме насыщения усиления, оценивается выражением

$$R_{кор} = R_{изм} - \left(\frac{c}{2} \cdot \Delta t_{нас} \right). \quad (11)$$

Результаты исследований

Значения исходных параметров элементов модели выбирались на основе анализа характеристик современных электронных компонентов и типичных условий лазерной локации. Параметры зондирующего сигнала соответствуют типовым характеристикам импульсных лазерных диодов. При этом пиковая мощность лазерного импульса составляла 75 Вт , а длительность импульса – 30 нс . Значения коэффициентов атмосферного ослабления лазерного излучения были выбраны для ближнего инфракрасного спектрального диапазона (905 нм) и нормальных атмосферных условий ($\alpha_n=0,02 \text{ км}^{-1}$; $\alpha_p=0,25 \text{ км}^{-1}$). Искажения принятого сигнала, обусловленные атмосферной турбулентностью, учитывались в широком диапазоне изменений структурной постоянной показателя преломления атмосферы (от слабой степени турбулентности $10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$ до сильной $10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$). В модели были реализованы возможности случайного изменения спектрального коэффициента отражения объекта в широком диапазоне от $0,1$ до $0,7$, уровня фона в диапазоне $0,03 \dots 0,15 \text{ Вт/см}^2 \text{ мкм}$ и углов наклона лазерного луча $0^0 \dots 70^0$. Параметры приемного устройства были выбраны в соответствии с типичными

характеристиками современных лавинных фотодиодов ($M=1\dots 100$; $F(M)=2,5$; $I_T=0,5\text{ нА}$; $\epsilon_\lambda=20\dots 50\text{ А/Вм}$) и операционных усилителей ($z=10\text{ кОм}$; $K_2=20$; $V_{\text{отр}}=5\text{ В}$; $\Delta f=150\text{ МГц}$) [5].

Результаты исследований адаптивных методов компенсации ошибок измерений ЛДУ в условиях флуктуаций параметров принимаемого сигнала и вариаций шума представлены на рис.3. Оценка эффективности этих методов в широком диапазоне рабочих измерительных циклов представлена на рис.4.

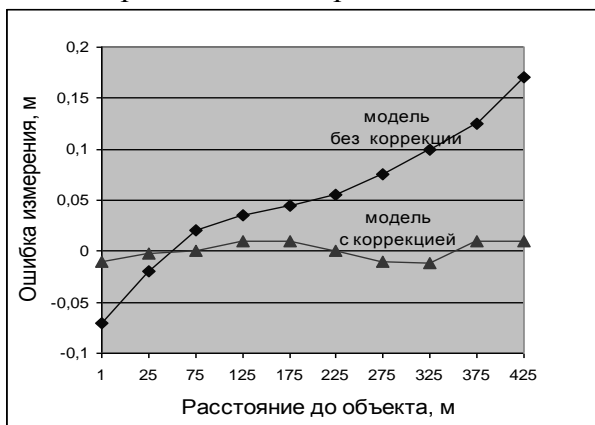


Рис. 3. Компенсация ошибок измерений ЛДУ

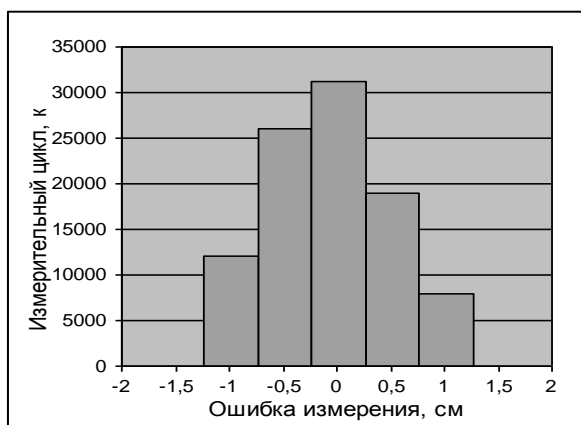


Рис. 4. Эффективность методов компенсации ошибок измерений

Результаты оценки ошибок измерений при использовании адаптивных методов управления усилением ЛФД при сильном возрастании уровня шума представлены на рис.5. Оценка эффективности применения адаптивного порога представлена на рис.6.

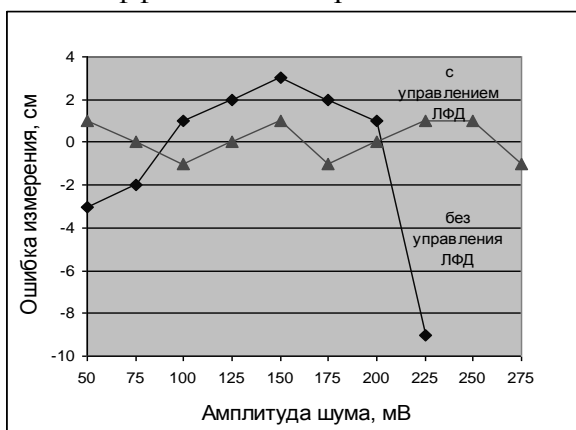


Рис. 5. Компенсация ошибок измерений ЛДУ при возрастании уровня шума

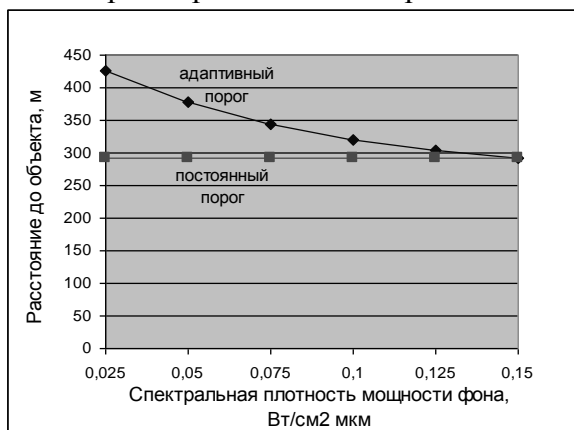


Рис. 6. Эффективность применения адаптивного порога

Выводы

Анализ полученных результатов показал, что применение адаптивных методов компенсации ошибок измерений ЛДУ в условиях флуктуаций амплитуды принимаемого сигнала и искажений его формы в режиме насыщения усиления позволяет существенно повысить точность измерений. Ошибки измерения не превышают $\pm 1\text{ см}$ для любых динамических изменений внешних условий и в широком диапазоне измеряемых расстояний. При этом устойчивые измерения в условиях возрастания уровня шума и максимальная дальность были достигнуты путем использования методов адаптивного управления усилением ЛФД и формирования адаптивного порога соответственно.

Список литературы: 1. Cole D. Using Laser Range Data for 3D SLAM in Outdoor Environments / D. Cole, P.M. Newman // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotic and Automation: ICRA-06, 2006. – pp. 188–193. 2. Ставров А.А. Импульсные лазерные дальнометры для оптико-локационных систем / Ставров А.А., Поздняков М.Г. // Минск: Доклады БГУИР. – 2003. – Т. 1, №2. – С. 59–65. 3. Вильнер В. Методы повышения точности импульсных лазерных дальнометров / В. Вильнер, А. Ларюшин, Е. Рудь // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2008. – №3. – С. 118–123.

4. Тюрин С.В., Формирование корректировочных поправок для лазерного измерителя расстояний. / Тюрин С.В., Тюрин В.С., Морозов И.С. // Радиотехника. – 2013. – Вып.173. – С. 137-144. 5. Redus R. Gain and noise in very high gain avalanche photodiodes: theory and experiment / R. Redus, R. Farrell // SPIE. – 1996. – Vol. 2859. – pp. 288–297.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 11.03.2014