

## АДАПТИВНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ СКАНЕР ДЛЯ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

### Введение

Одной из особенностей современного этапа развития радиотехнических информационных систем является создание и широкое внедрение в различных отраслях промышленности и военной области компактных мобильных роботизированных комплексов [1]. К ним относятся мобильные трехмерные сканеры, роботизированные навигационные платформы, системы оперативного мониторинга, устройства автоматического сближения и стыковки объектов, бортовые приборы картографирования местности, многофункциональные дистанционные измерители промышленного и военного назначения. Такие комплексы предназначены для дистанционного оперативного сбора многопараметрической информации об исследуемых объектах и окружающей обстановке в труднодоступных и опасных для человека зонах с последующей передачей полученных данных по радиоканалу на пульт управления. При этом комплексы могут управляться дистанционно или осуществлять свои функции автономно.

Важной задачей мобильных комплексов является обеспечение их автономного безопасного передвижения в условиях сложного рельефа местности и высокоточного выполнения операций манипулятором и другими исполнительными устройствами [2]. С этой целью они оборудуются лазерными сканерами, осуществляющими высокоточные скоростные измерения расстояния до поверхности исследуемых объектов и ближайших препятствий в заданном угловом секторе на пути следования [3]. При этом измерения происходят в динамически изменяющихся внешних условиях и при непрерывном изменении пространственного положения объектов, что вызывает флуктуации параметров принятых сигналов и обуславливает появление значительных измерительных ошибок [4]. В связи с этим возникает актуальная задача адаптации параметров лазерного сканера к изменяющимся условиям и разработки эффективных методов компенсации ошибок измерения.

Целью работы – исследование адаптивных методов компенсации ошибок измерения лазерного сканера для высокоточного построения маршрута движения и обеспечения безопасного преодоления препятствий мобильными комплексами.

### Исследование методов компенсации ошибок измерения расстояния

Типичная структура мобильных комплексов состоит из управляемой подвижной колесной или гусеничной платформы, измерителя расстояния, комплекта различных информационных датчиков, телевизионных камер, навигационной системы, исполнительных устройств и пульта дистанционного управления. Внешний вид и основные элементы мобильного комплекса, разработанного в НУЦ ОРТ, представлены на рис.1.

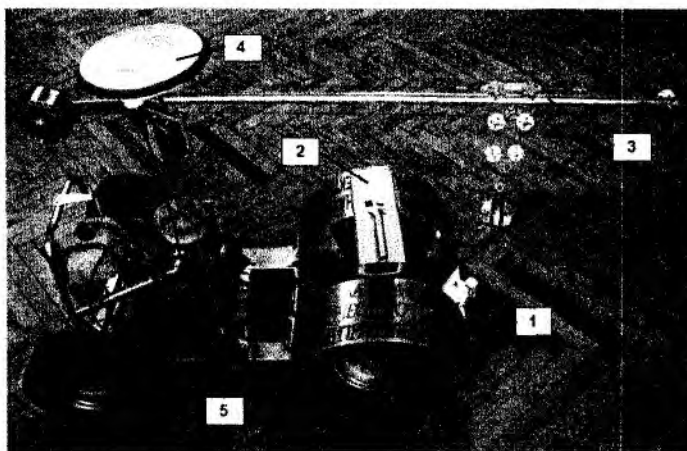


Рис.1. Мобильный комплекс с высокоточным лазерным сканером

В его состав мобильного комплекса входят:

1. Мобильная многофункциональная платформа.
2. Лазерный сканер со встроенной видеокамерой.
3. Роботизированный подъемный манипулятор.
4. GPS приемник.
5. Устройство обработки и управления.

Для эффективного функционирования мобильного комплекса на неизвестной местности необходимо осуществить обнаружение препятствий на пути следования, с высокой точностью измерить расстояние до них и построить оптимальный маршрут движения для их преодоления. Традиционно такая задача решается путем применения комбинации телевизионных систем с дальномерными средствами [5]. При этом телевизионная информация используется для дистанционного управления платформой, а дальномерная – для автоматического решения задачи безопасного преодоления препятствий и высокоточного управления манипулятором. В большинстве случаев в качестве дальномерных устройств применяют лазерные измерители. В отличие от ультразвуковых датчиков они обеспечивают большую дальность действия и высокую точность определения пространственного положения препятствий.

Лазерный сканер представляет собой компактное дальномерное устройство, расположенное на поворотной двухосевой электромеханической платформе. Он осуществляет высокоскоростные измерения расстояния в условиях динамического изменения пространственного положения протяженных объектов с локально неоднородной неплоской поверхностью и значительных колебаний уровня фона, которые обуславливают существенные флуктуации амплитуды и искажения формы принимаемых сигналов [6]. Это приводит к уменьшению отношения сигнал/шум и случайному сдвигу момента срабатывания временных дискриминаторов, что обуславливает появление значительных ошибок измерения временного интервала между излученным и принятым от объекта импульсом.

Существующие методы снижения таких ошибок основаны на использовании временных дискриминаторов, не чувствительных к изменениям амплитуды принимаемого сигнала [7]. Однако они эффективны лишь в линейной области изменения сигнала и в достаточно ограниченном динамическом диапазоне, что обуславливает необходимость применения средств автоматической регулировки усиления. При нелинейных искажениях сигнала, обусловленных изменениями отражательных характеристик локально неоднородной наклонной поверхности при высокоскоростном сканировании местности и перегрузками приемного тракта, эти методы становятся непригодными [8]. Кроме этого, ситуация ухудшается появлением в этих условиях шумов и помех аддитивного и мультипликативного характера, которые приводят к значительному возрастанию ошибок измерений, а в некоторых случаях к неустойчивой работе фотоприемного устройства.

При фиксации импульса по переднему фронту в условиях значительных флуктуаций амплитуды и нелинейных искажений формы доминируют два вида ошибок:

- ошибки измерения  $\Delta t_{амп}$ , обусловленные флуктуациями амплитуды импульсов;
- ошибки измерения  $\Delta t_u$ , обусловленные искажениями импульсов в режиме насыщения усиления.

При этом, как показали исследования, каждому значению амплитуды и 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.

На этом основании были разработаны методы компенсации ошибок измерений:

1. Коррекция в реальном времени значений дальности ( $R$ ) с помощью поправок, сформированных на основе измерения амплитуды принятых импульсов:

$$\tilde{R} = R - \left(\frac{c}{2} \cdot \Delta t_{амп}\right), \quad (1)$$

При этом необходимо построить функциональную зависимость таких поправок от амплитуды импульсов  $U_a$ :

$$\Delta t_{амп} = f(U_a), \quad (2)$$

2. Коррекция в реальном времени значений дальности ( $R$ ) с помощью поправок, сформированных на основе измерения длительности ограниченных по амплитуде импульсов в режиме насыщения усиления:

$$\tilde{R} = R - \left(\frac{c}{2} \cdot \Delta t_u\right), \quad (3)$$

При этом необходимо построить функциональную зависимость таких поправок от длительности импульсов в режиме насыщения усиления ( $\tau_u$ ):

$$\Delta t_u = f(\tau_u). \quad (4)$$

В отсутствие априорной информации о форме принятого сигнала модель оценки коррекционных поправок была построена на основе реальных функциональных зависимостей ошибок измерений от амплитуды принятого импульса и от длительности ограниченного по амплитуде импульса в режиме насыщения усиления, полученных на этапе макетирования устройства. При этом такие зависимости аппроксимировались кусочно-линейными функциями. Для этого случая было получено выражение для оценки поправок на каждом линейном участке зависимости при компенсации ошибок, обусловленных флуктуациями амплитуды импульса:

$$\Delta t_{амп} = \left[ \frac{(\Delta t_2 - \Delta t_1)}{(U_2 - U_1)} \times (U_{макс} - U_1) \right] + \Delta t_1, \quad (5)$$

где  $\Delta t_1$ ;  $\Delta t_2$  – граничные значения временной задержки для выбранного линейного участка зависимости;  $U_1$ ;  $U_2$  – значения амплитуды импульса, соответствующие граничным значениям выбранного линейного участка зависимости;  $U_{макс}$  – измеренная амплитуда импульса.

Для оценки поправок на каждом линейном участке зависимости при компенсации ошибок, обусловленных расширением импульсов в режиме насыщения усиления, было получено соотношение

$$\Delta t_u = \frac{(\Delta t_2 - \Delta t_1)}{(\tau_{u2} - \tau_{u1})} \times [T_0 (n_{кз} - n_{кп}) - \tau_{u1}] + \Delta t_1, \quad (6)$$

где  $\tau_{u1}$ ;  $\tau_{u2}$  – значения длительностей импульса, соответствующие граничным значениям выбранного линейного участка зависимости;  $T_0$  – период тактовых импульсов измерителя временных интервалов;  $n_{кз}$  – количество периодов тактовых импульсов при остановке измерителя задним фронтом;  $n_{кп}$  – количество периодов тактовых импульсов при остановке измерителя передним фронтом.

Эти поправки оцениваются для фиксированного (известного) значения порогового напряжения. В случае использования адаптивного порога поправки оцениваются для всего диапазона изменений порогового напряжения. Формирование адаптивного порога осуществляется на основе измерения текущего уровня шума.

Измеритель амплитуды сигнала и уровня шума был реализован на базе ПЛИС Xilinx (XC3S200-5VQ100), структура которого представлена на рис. 2.

Измерения амплитуды сигнала и шума происходят на разных временных интервалах. Сначала измеряется амплитуда сигнала на интервале, соответствующем максимально возможной дальности до объекта согласно выражению

$$U_{\text{макс}}(t) = \begin{cases} U_{i+1}(t), & \text{если } U_{i+1}(t) \geq U_i(t) \\ U_i(t), & \text{если } U_{i+1}(t) < U_i(t) \end{cases} \quad (7)$$

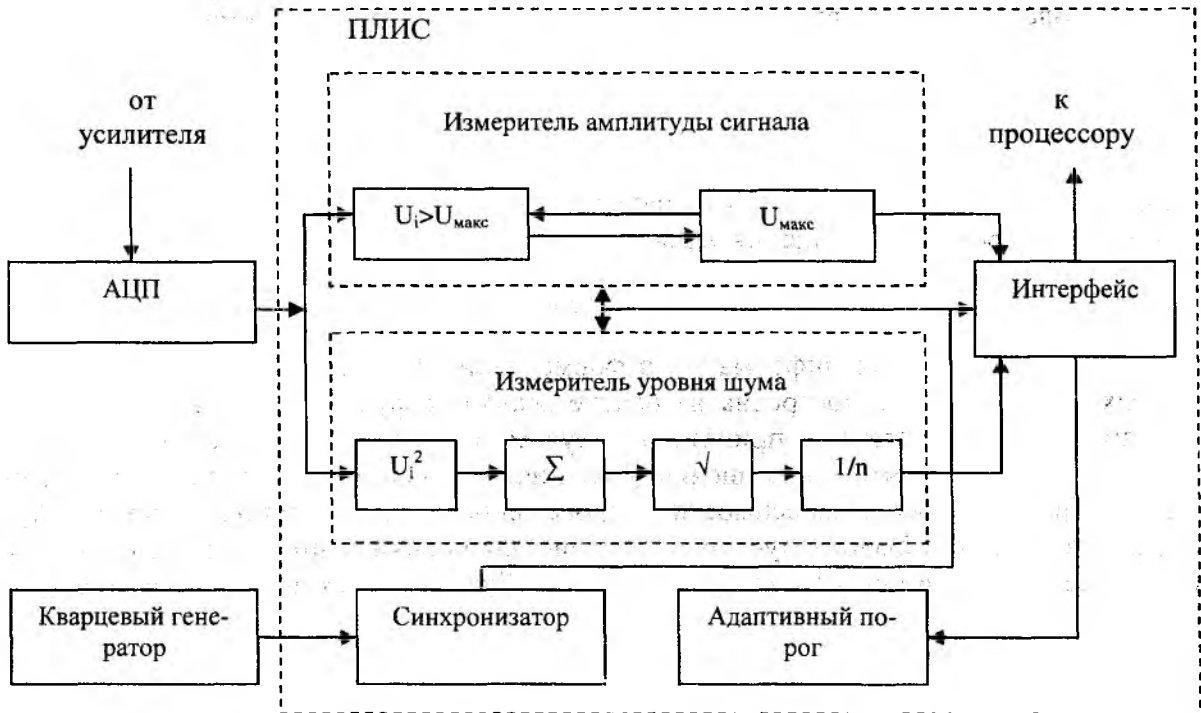


Рис. 2. Структура измерителя амплитуды сигнала и уровня шума

После этого измеряется уровень шума на временном интервале в отсутствии отраженного сигнала согласно выражению

$$\sigma_{ш} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (U_{iш} - m_{ш})^2}, \quad (8)$$

где  $\sigma_{ш}$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) шума;  $U_{iш}$  – текущее значение шумового напряжения;  $m_{ш}$  – МОЖ шумового напряжения.

Измеренные значения амплитуды и уровня шума поступают в микропроцессор для формирования поправок. Кроме этого, текущее значение шума используется в качестве адаптивного порога для временного дискриминатора.

Измеритель длительности сигнала в режиме насыщения усиления был реализован на базе высокоточного время-цифрового преобразователя TDC-GP2 с разрешением 50 нс, структура которого представлена на рис. 3.

Для измерения длительности импульса в режиме насыщения усилителя используют двухканальный режим работы TDC, который запускается СТАРТ-импульсом. При этом в одном канале счет останавливается передним фронтом Стоп-импульса, а в другом канале – задним фронтом Стоп-импульса. Разность значений двух измеренных интервалов соответствует длительности импульса согласно выражению

$$\tau_u = T_0 \cdot (n_{кз} - n_{кн}), \quad (9)$$

Полученные данные поступают в микропроцессор для формирования поправок.

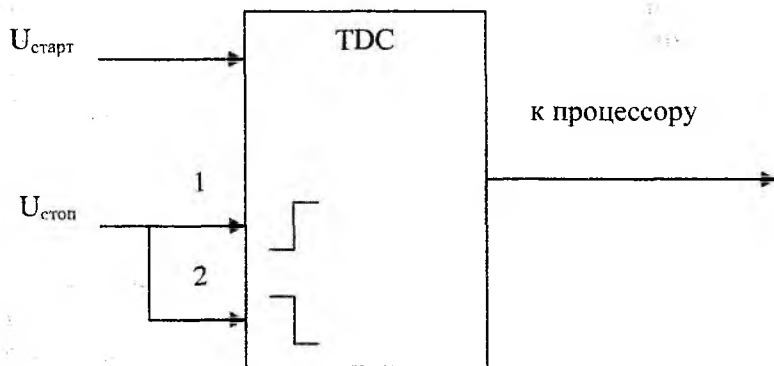


Рис. 3. Измеритель длительности сигнала в режиме насыщения усиления

Кроме этого, для обеспечения устойчивого функционирования лазерного сканера в условиях значительных колебаний уровня фона было реализовано адаптивное управление параметрами фотоприемного устройства. С этой целью производилось управление усилением лавинного фотодиода (ЛФД). Структурная схема контура управления усилением ЛФД представлена на рис. 4.

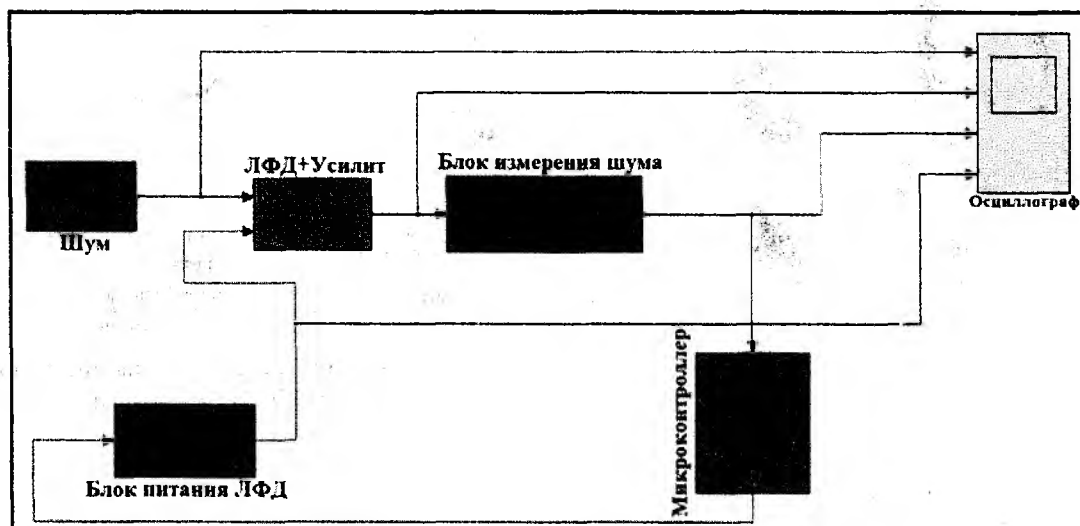


Рис. 4. Структурная схема контура управления усилением ЛФД

Процесс управления усилением основан на изменении напряжения источника питания ЛФД в случае изменения уровня шума. При этом управляющий сигнал формируется в микроконтроллере на основе результатов измерения шума и изменяет коэффициент усиления  $K(U_{ш})$  согласно выражению

$$K(U_{ш}) = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{ш} < U_{гр} \\ K_i, & \text{если } U_{ш} \geq U_{гр} \end{cases}, \quad (10)$$

где  $U_{гр}$  – граничное значение порога, которое рассчитывается из соотношения

$$U_{гр} = q(D, F) \cdot \sigma_{ш}, \quad (11)$$

где  $q(D, F)$  – отношение сигнал/шум, которое обеспечивает заданные значения вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги.

### Экспериментальные результаты

На основе разработанных методов была синтезирована имитационная модель и разработан макет лазерного дальномерного устройства (ЛДУ). Макет собран на едином шасси, а его

габаритные размеры определяются конструкцией оптических модулей и размерами печатных плат. Измеритель амплитуды сигнала и уровня шума был размещен на плате оптоэлектронного приемного модуля, а измеритель длительности ограниченного по амплитуде сигнала в режиме насыщения усиления – на микропроцессорной плате. Управление напряжением питания ЛФД осуществлялось на плате питания.

Экспериментальные исследования макета заключались в оценке точности определения калиброванных расстояний до различных объектов с локально неоднородной поверхностью в условиях реальной турбулентной атмосферы и вариациях освещенности. При этом влияние атмосферы и изменения отражательных характеристик локальных участков протяженных объектов приводили к флуктуациям амплитуды принимаемых сигналов, а наличие «зеркальных» областей и отражений от близких объектов обуславливали ограничение сигнала по амплитуде в режиме насыщения усиления.

Внешний вид макета ЛДУ и его основные элементы представлены на рис. 5. Осциллограммы ограниченного по амплитуде отраженного сигнала и СТОП импульса представлены на рис. 6.

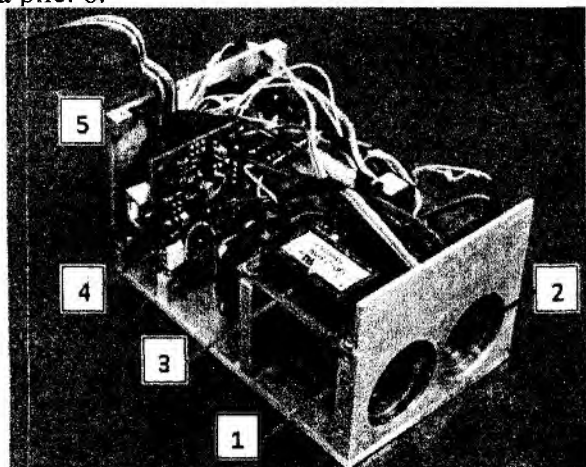


Рис. 5. Макет ЛДУ

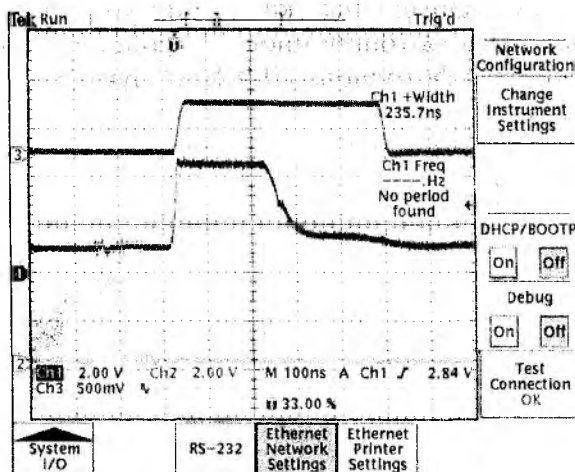


Рис. 6. Осциллограммы отраженного сигнала и СТОП импульса

В состав макета входят:

1. Лазерный передающий модуль.
2. Оптоэлектронный приемный модуль.
3. Плата питания.
4. Плата микропроцессора.
5. Интерфейс.

Были проведены испытания и получены экспериментальные зависимости ошибок измерения от амплитуды сигнала и от длительности ограниченного по амплитуде сигнала в режиме насыщения усиления согласно выражениям (5) и (6). При этом изменения амплитуды и длительности сигнала осуществлялись с помощью калиброванных отражательных пленок, применением набора нейтральных светофильтров и вариацией расстояния между лазерным излучателем и объектом. Построение экспериментальных зависимостей проводилось для различных значений уровня порога от 50 до 216,4 мВ.

Результаты построения таких зависимостей представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

Данные зависимости сохраняются в микропроцессоре и используются в качестве поправок для компенсации ошибок измерения лазерного сканера в условиях флуктуаций амплитуды сигнала и искажений формы в режиме насыщения усиления.

Были проведены исследования контура управления усилением ЛФД. Диаграммы, поясняющие этот процесс, представлены на рис. 9.

Алгоритм работы контура управления ЛФД состоит в следующем. Изменения уровня шума (граф. 2), которые обусловлены вариациями внешнего фона, флуктуациями параметров устройств или изменениями температуры, фиксируются в блоке измерения шума, где определяется СКО шума на заданном временном интервале (граф. 3). На основе этого в микро-

контроллере формируется управляющий сигнал для изменения напряжения источника питания ЛФД (граф. 4). При этом с увеличением уровня шума напряжение питания ЛФД уменьшается и, следовательно, уменьшается коэффициент усиления согласно соотношениям (10) и (11). Это позволяет обеспечить устойчивую работу ФПУ в условиях возрастания шума.

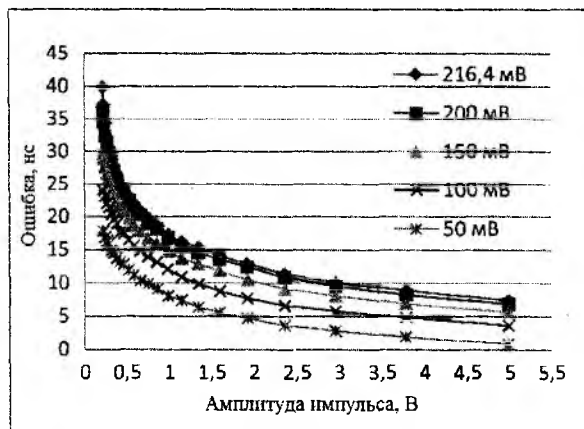


Рис. 7. Зависимость ошибок измерения от амплитуды сигнала

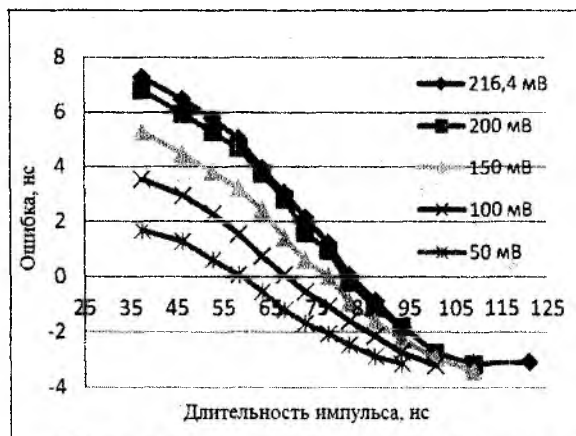


Рис. 8. Зависимость ошибок измерения от длительности сигнала

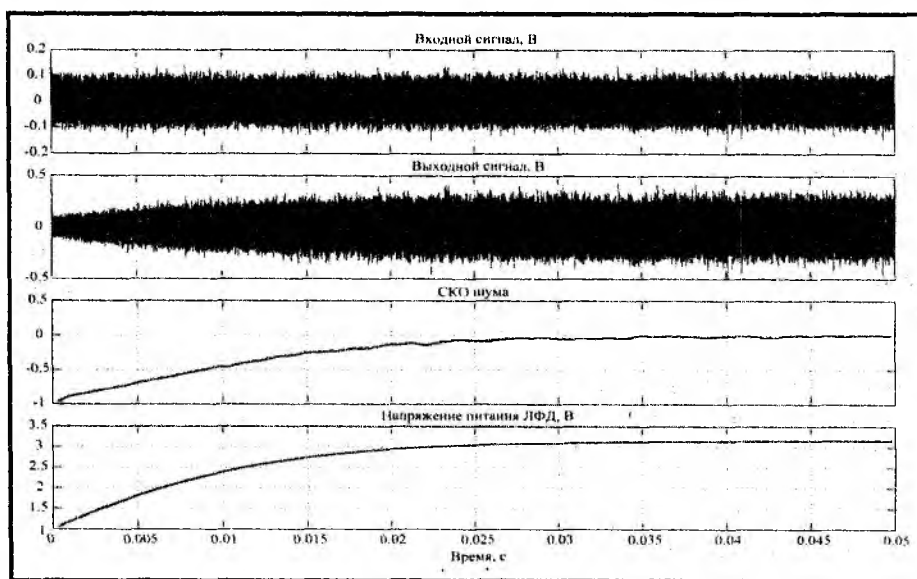


Рис. 9. Выходные сигналы контура управления усилением ЛФД

Оценка эффективности разработанных методов заключалась в сравнении ошибок измерения дальности, полученных в ходе проведения экспериментальных исследований макета и тестирования модели при идентичных параметрах и условиях измерений. Результаты оценки измерительных ошибок при моделировании и полевых испытаниях макета, а также в условиях возрастания шума представлены на рис. 10 и 11.

### Заключение

Анализ результатов проведенных исследований показал, что применение методов компенсации ошибок измерений позволяет существенно повысить точность измерений лазерного дальномерного устройства в условиях флуктуаций амплитуды принятого сигнала и искажений его формы в режиме насыщения усиления. При этом ошибки измерения дальности макета и модели с использованием коррекции не превышают  $\pm 1$  см во всем диапазоне изменений параметров внешних воздействий. Ошибки измерений модели без коррекции для идентичных условий существенно больше и находятся в пределах  $-7 + 17$  см. При использовании ЛФД без управления усиления ошибки измерений существенно возрастают в случае незначительного превышения установленного граничного порогового значения напряжения

(200 мВ). Дальнейшее неконтролируемое возрастание уровня шума для такого ЛФД приводит к срыву процесса измерений.

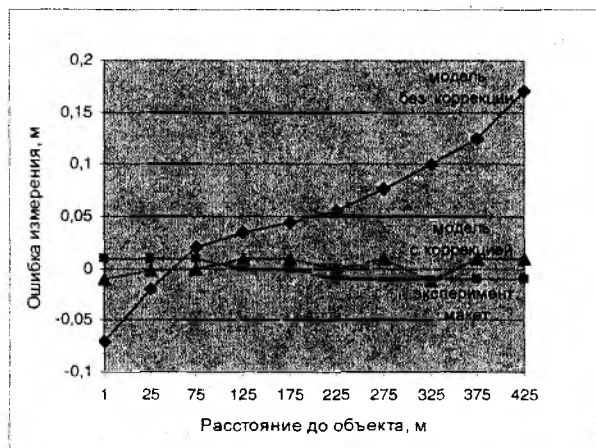


Рис. 10. Ошибки измерения модели и макета ЛДУ

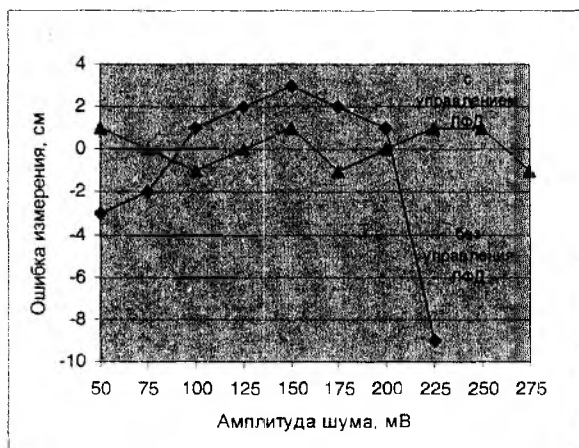


Рис. 11. Ошибки измерений в условиях возрастания уровня шума

Применение разработанных методов обеспечивает:

- адаптацию ЛДУ к любым динамическим изменениям внешних условий при быстром сканировании объектов;
- эффективную компенсацию ошибок измерений практически в неограниченном динамическом диапазоне, что устраняет необходимость применения средств АРУ;
- повышение быстродействия ЛДУ за счет коррекции каждого из результатов измерений;
- высокую точность измерений, которая практически ограничивается только разрешением используемого измерителя временных интервалов (для TDC-GP2 ошибка составляет  $\pm 1\text{см}$ , а для TDC-GPX –  $\pm 1\text{мм}$ ).

**Список литературы:** 1. Everett, H. Robotic Security Systems. IEEE Instruments and Measurements Magazine. – 2003. – Vol.6, No.4. – P.30-34. 2. Lacroix, S., et al., Autonomous Rover Navigation on Unknown Terrains: Functions and Integration // International Journal of Robotics Research. – Vol.21, No. 10 – 11. – P. 917 – 942, 2002. 3. Cole, D.M., Newman, P.M. Using Laser Range Data for 3D SLAM in Outdoor Environments. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotic and Automation (ICRA-06), Orlando, Florida, USA, May 2006. 4. Шульц, Р. Аналіз методів та моделей калібрування наземних лазерних сканерів // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2011. – Вип. П(22). – С.128-133. 5. Коваль, В. Злиття структурованого світла і відеокамери для управління мобільним роботом // Штучний інтелект. – 2004. – №1. – С.52-59. 6. Данилин, И.М., Медведев, Е.М., Мельников, С.Р. Лазерная локация земли и леса. – Красноярск, 2005. – 182 с. 7. Kilpelä, A., Ylitalo, J., Määtta, K., Kostamovaara, J. Timing discriminator for pulsed time-of-flight laser rangefinder measurement // Review of Scientific Instruments. – 1998. – Vol. 69, №5. – P. 1978-1984. 8. Вильнер, В., Ларюшин, А., Рудь, Е. Методы повышения точности импульсных лазерных дальномеров // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2008. – №3. – С. 118-123.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 11.04.2012