

# ФОРМИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО ПОРОГА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*В. С. ТЮРИН, Ю. П. МАЧЕХИН*

В статье представлены результаты оценки эффективности применения адаптивного порога в полупроводниковом лазерном дальномере в условиях изменяющегося фона и исследованы методы его формирования.

The results of estimating the efficiency of using the adaptive threshold in a semiconductor laser ranger under the conditions of a changing background are presented. The methods of its formation are investigated.

Одной из актуальных задач лазерной дальнометрии является повышение точности измерения расстояний до объектов в условиях непрерывного изменения их пространственного положения и значительных вариаций освещенности. В этих условиях резкие колебания амплитуды принимаемых сигналов и уровня внешнего фонового излучения приводят к заметному снижению отношения сигнал/шум в приемном тракте и уменьшению динамического диапазона фотодетектора, что обуславливает появление случайных ошибок измерений и ухудшение точностных характеристик дальномеров [1].

Существующие методы снижения таких ошибок основаны на использовании временных дискриминаторов, не чувствительных к изменениям амплитуды отраженного сигнала [2]. Однако, в реальных условиях при измерении расстояния до протяженных пространственно-неоднородных объектов на длинных дистанциях наряду с флуктуациями амплитуды наблюдаются значительные искажения формы и длительности отраженных сигналов, что существенно снижает эффективность этих методов. Поэтому актуальной становится задача разработки новых методов и устройств, позволяющих снизить влияние этих факторов на точность измерений.

В дискриминаторах с постоянным уровнем порога ошибки измерений связаны с задержкой сигнала, обусловленной случайными изменениями моментов срабатывания компаратора. Существенно уменьшить эти ошибки в импульсном полупроводниковом лазерном дальномере можно за счет использования адаптивного порога, формирующегося путем измерения текущего значения уровня фона (шума), с последующей динамической обработкой данных измерений в микропроцессоре для введения поправок в окончательный результат. Эти поправки компенсируют в реальном масштабе времени ошибки измерений, обусловленные флуктуацией параметров отраженных сигналов.

В этой связи, целью настоящих исследований была оценка возможности снижения ошибок измерения лазерного дальномера в условиях изме-

няющегося фонового излучения и анализ метода формирования адаптивного порога, учитывающего реальный уровень шумового напряжения.

Величина порогового напряжения определяется уровнем шума измерительного тракта с учетом обеспечения требуемых значений вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги. В общем случае величину порогового напряжения можно оценить из выражения:

$$U_{\text{пор}} = \sqrt{\bar{i}_{\text{ш}}^2} \cdot R_{\text{н}} \cdot q(D, F), \quad (1)$$

где  $U_{\text{пор}}$  — пороговое напряжение;  $\bar{i}_{\text{ш}}^2$  — дисперсия шумового тока измерительного тракта;  $R_{\text{н}}$  — сопротивление нагрузки усилительного каскада;  $q(D, F)$  — отношение сигнал/шум, которое обеспечивает требуемые значения вероятности правильного обнаружения  $D$  и ложной тревоги  $F$ .

В полупроводниковых лазерных дальномерах в качестве фотодетектора чаще всего применяют лавинные фотодиоды (ЛФД), чувствительность которых бывает на несколько порядков выше, чем у PIN-фотодиодов. При этом дисперсия шумового тока приемного устройства с ЛФД представляет собой сумму дисперсий основных независимых шумовых составляющих:

$$\bar{i}_{\text{ш}}^2 = \bar{i}_{\text{т}}^2 + \bar{i}_{\text{с}}^2 + \bar{i}_{\text{ф}}^2 + \bar{i}_{\text{обр}}^2 + \bar{i}_{\text{э}}^2, \quad (2)$$

где  $\bar{i}_{\text{т}}^2$  — дисперсия дробового шума темнового тока;  $\bar{i}_{\text{с}}^2$  — дисперсия дробового шума измерительного сигнала;  $\bar{i}_{\text{ф}}^2$  — дисперсия дробового шума фонового излучения;  $\bar{i}_{\text{обр}}^2$  — дисперсия дробового шума излучения обратного рассеяния;  $\bar{i}_{\text{э}}^2$  — дисперсия теплового шума электронного тракта.

В условиях реальной атмосферы для лазерного дальномера доминирующим становится шум, обусловленный флуктуациями фонового излучения. В этом случае дисперсия шумового фототока определяется выражением [3]:

$$\bar{i}_{\text{ш}}^2 = \bar{i}_{\text{ф}}^2 = 2 \cdot e \cdot \Delta f \cdot M^x \cdot K \cdot \overline{P_{\text{ф}}} \cdot \epsilon_{\lambda}, \quad (3)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $\Delta f$  — полоса пропускания приемного канала;  $M$  — коэффициент умножения ЛФД;  $x$  — коэффициент, зависящий от материала ЛФД;  $K$  — фактор шума;  $\overline{P_{\text{ф}}}$  — средняя мощность

фонового излучения;  $\varepsilon_\lambda$  — спектральная чувствительность ЛФД на длине волны лазерного излучения.

Источниками фонового излучения являются Солнце, планеты, облака, атмосфера и поверхность Земли. Мощность фонового излучения в дневных условиях и при узкой полосе интерференционного фильтра рассчитывается из соотношения:

$$\overline{P}_\phi = B_\lambda \cdot S_{\text{пр}} \cdot \omega \cdot \Delta\lambda \cdot T_{\text{пр}}, \quad (4)$$

где

$$B_\lambda = \mu_0 \cdot I_0 \cdot \frac{\cos \psi}{\pi}, \quad (5)$$

$B_\lambda$  — яркость безоблачного неба;  $\mu_0$  — коэффициент, характеризующий распределение яркости по небосводу;  $I_0$  — плотность потока солнечного излучения на верхней границе атмосферы;  $\psi$  — зенитный угол Солнца;

$$S_{\text{пр}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{пр}}^2}{4}, \quad (6)$$

$S_{\text{пр}}$  — площадь приемного объектива;

$$\omega = \frac{\pi \cdot l^2}{4 \cdot F^2}, \quad (7)$$

$\omega$  — телесный угол поля зрения фотоприемного устройства;  $l$  — диаметр чувствительной области фотодетектора;  $F$  — фокусное расстояние приемного объектива;  $\Delta\lambda$  — полоса пропускания интерференционного фильтра;  $T_{\text{пр}}$  — коэффициент пропускания приемной оптической системы.

Мощность фонового излучения может быть снижена методами пространственной и спектральной фильтрации. Для этого осуществляют выбор оптимальных величин поля зрения приемной оптической системы и полосы интерференционного фильтра, которые обеспечивают достаточный уровень полезного сигнала и минимизируют уровень фонового излучения.

На рис. 1 представлена зависимость величины средней мощности фонового излучения от фокусного расстояния приемного объектива для различных значений полосы пропускания интерференционного фильтра.

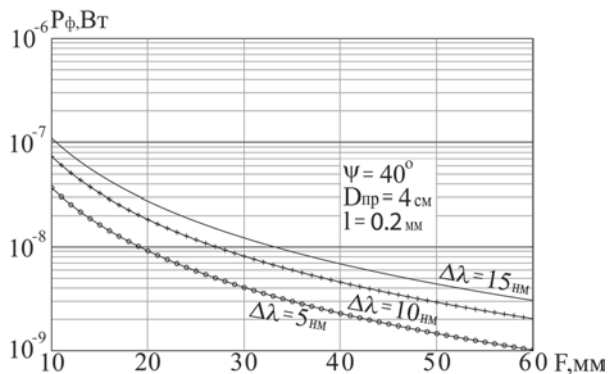


Рис. 1. Зависимость средней мощности фонового излучения от фокусного расстояния приемного объектива

Анализ полученных результатов свидетельствует, что увеличение фокусного расстояния и уменьшение полосы пропускания интерференционного фильтра приводит к снижению уровня фонового излучения, однако это влечет за собой увеличение массогабаритных характеристик лазерного устройства.

Обычно оценку уровня шума осуществляют для наихудших фоновых условий с целью обеспечения минимальной вероятности ложного срабатывания, что обуславливает максимальное значение уровня порогового напряжения. В этом случае существенно возрастает задержка сигнала в компараторе. Эта задержка ( $\Delta t_3$ ) обусловлена изменениями момента (точка A) пересечения входным импульсом некоторого порогового напряжения  $U_{\text{пор}}$  (рис. 2).

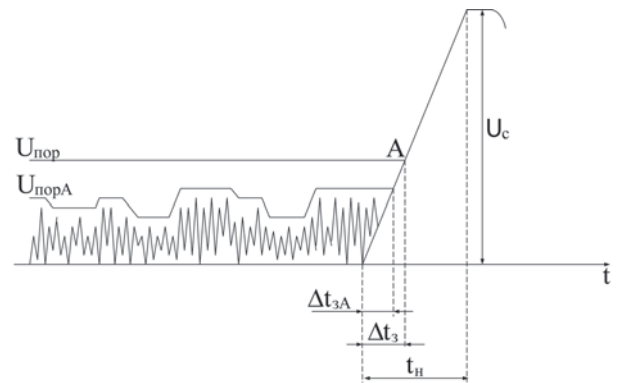


Рис. 2. Адаптивный и постоянный порог в полупроводниковом импульсном лазерном дальномере

Момент пересечения входным импульсом порогового напряжения зависит от скорости нарастания амплитуды (крутизны) импульса и абсолютного уровня порогового напряжения. Скорость нарастания импульса связана, в свою очередь, с формой и амплитудой принимаемого сигнала, которые являются функциями отражательных характеристик, структуры и пространственного положения объекта, измеряемой дистанции и окружающей атмосферы.

При линейной аппроксимации переднего фронта импульса временную задержку сигнала компаратора с постоянным порогом можно оценить из выражения:

$$\Delta t_3 = t_n \cdot \frac{U_{\text{пор}}}{U_c}, \quad (8)$$

где  $\Delta t_3$  — временная задержка компаратора;  $U_{\text{пор}}$  — пороговое напряжение;  $U_c$  — амплитуда измеряемого сигнала;  $t_n$  — время нарастания импульса.

В случае использования компаратора с адаптивным порогом задержка сигнала определяется соотношением (рис. 2):

$$\Delta t_{3.A} = t_n \cdot \frac{U_{\text{пор.А}}}{U_c}, \quad (9)$$

где  $\Delta t_{3.A}$  — задержка компаратора с адаптивным порогом;  $U_{\text{пор.А}}$  — напряжение адаптивного порога.

Тогда ошибку измерения расстояния, обусловленную временной задержкой в компараторе, для адаптивного ( $\Delta R_A$ ) и постоянного ( $\Delta R$ ) порогов можно оценить из выражений:

$$\Delta R_A = \frac{c \cdot \Delta t_{3.A}}{2}; \quad (10)$$

$$\Delta R = \frac{c \cdot \Delta t_3}{2}. \quad (11)$$

Эффективность применения адаптивного порога можно оценить на основе анализа отношения ошибок измерения расстояний. С учетом выражений (8–11) получим соотношение:

$$\frac{\Delta R_A}{\Delta R} = \frac{U_{\text{пор.А}}}{U_{\text{пор}}}. \quad (12)$$

Результаты оценки приведены на рис. 3.

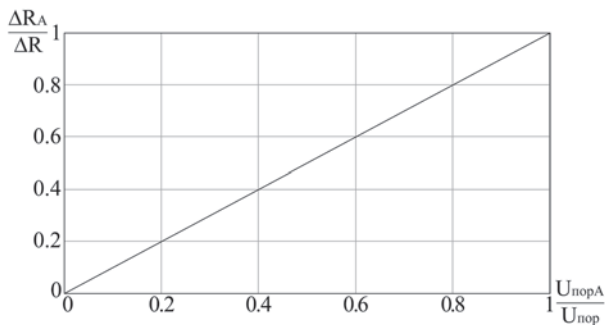


Рис. 3. Зависимость отношения ошибок измерения от отношения пороговых напряжений

Анализ результатов показал, что точность измерения расстояний при использовании адаптивного порога становится тем выше, чем больше отличие значений напряжений адаптивного и постоянного порогов.

Для оценки эффективности использования адаптивного порога было проведено моделирование работы полупроводникового лазерного дальномера с адаптивным порогом и с постоянным порогом срабатывания компаратора. Модель лазерного дальномера была разработана ранее в программной среде MATLAB и представлена в [4].

В данной модели компаратор представляет собой устройство, на выходе которого формируется сигнал в случае превышения поступающего на его вход импульса некоторого порогового уровня. Уровень порога зависит от величины шума измерительного тракта и может быть постоянным или изменяющимся (адаптивным) в зависимости от условий измерений. Модель компаратора с адаптивным порогом представлена на рис. 4.

Компаратор выполнен в виде двух элементарных блоков, один из которых производит сравнение мгновенных значений сигналов на обоих своих входах и в случае превышения сигнала относительно порогового  $U_{\text{пор}}(t)$  выдает команду на второй блок для формирования выходного напряжения, равного напряжению питания схемы. На опорный вход компаратора подается сигнал с формирователя адаптивного порога, выполнен-

ного на основе пикового детектора и реализованного комбинацией элементарных блоков.

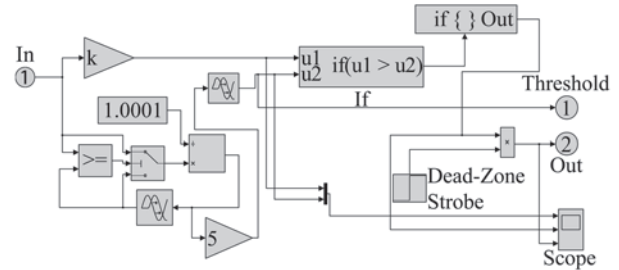


Рис. 4. Модель компаратора с адаптивным порогом

Для реализации адаптивного порога используют пиковый детектор, который отслеживает вариации шума на некотором временном интервале. С выхода пикового детектора изменяющееся напряжение в качестве порога поступает на вход компаратора.

Напряжение адаптивного порога представлено на рис. 5.

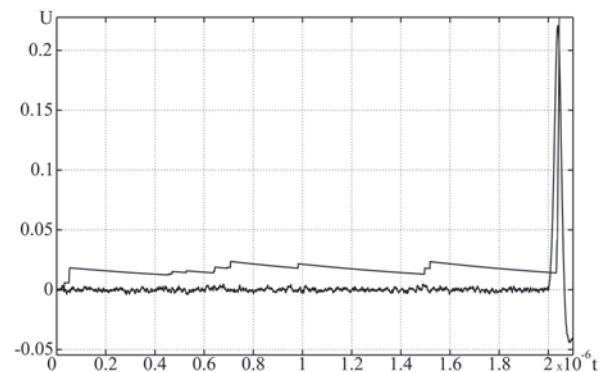


Рис. 5. Напряжение адаптивного порога

Модель компаратора с постоянным уровнем порога представлена на рис.6. На первый вход компаратора поступает смесь полезного сигнала и шума, а на второй вход поступает постоянное напряжение, которое образуется в цепи формирования постоянного порога. Величина этого порога определяется суммарным значением всех шумовых составляющих измерительного тракта. Кроме этого, в цепи формирования постоянного порога находится блок установки требуемого отношения сигнал/шум, величина которого определяется заданными значениями вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги.

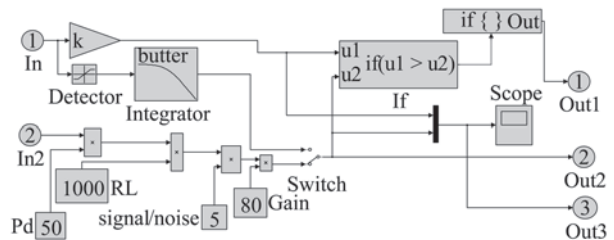


Рис. 6. Модель компаратора с постоянным порогом

Напряжение постоянного порога представлено на рис. 7.

Таблица 1

| №  | Задаваемая дальность, м | Дальность (адаптивный порог), м | Дальность (постоянный порог), м |
|----|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1  | 25                      | 24,98                           | 25,08                           |
| 2  | 50                      | 50,02                           | 50,06                           |
| 3  | 75                      | 74,95                           | 75,14                           |
| 4  | 100                     | 100,03                          | 100,09                          |
| 5  | 125                     | 125,04                          | 125,11                          |
| 6  | 150                     | 149,99                          | 149,96                          |
| 7  | 175                     | 175,03                          | 174,87                          |
| 8  | 200                     | 199,94                          | 199,81                          |
| 9  | 225                     | 225,02                          | 224,85                          |
| 10 | 250                     | 249,96                          | 249,88                          |
| 11 | 275                     | 274,97                          | 274,89                          |
| 12 | 300                     | 299,95                          | 299,87                          |

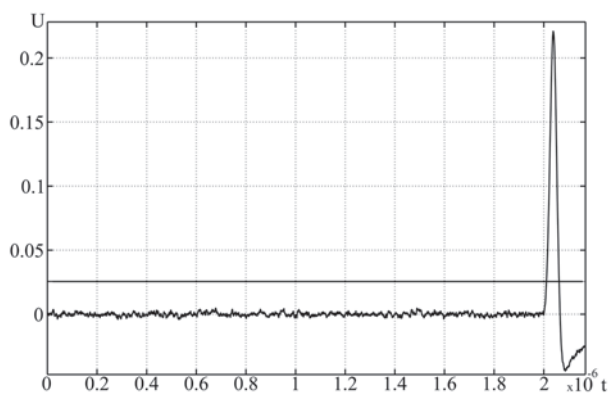


Рис. 7. Напряжение постоянного порога

На рис. 8 представлены результаты моделирования работы компараторов с постоянным и адаптивным порогами при идентичных условиях измерений.

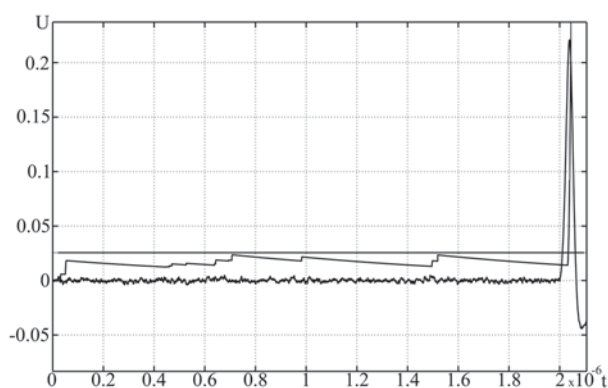


Рис. 8. Сигнал с адаптивным и постоянным порогами

Анализ полученных результатов показывает, что использование адаптивного порога в условиях незначительного уровня фонового излучения позволяет существенно расширить динамический диапазон устройства за счет реализации возможности приема сигналов от объектов, находящихся на более удаленном расстоянии, чем в случае применения компаратора с постоянным порогом с заведомо более высоким уровнем порогового напряжения.

Было проведено модельное исследование точностных характеристик полупроводникового лазерного дальномера при использовании адаптивного и постоянного порогов. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показывает, что точность измерения расстояний импульсным полупроводниковым лазерным дальномером с адаптивным порогом выше, чем при использовании такого же дальномера с постоянным порогом срабатывания компаратора.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что применение адаптивного порога срабатывания компаратора в условиях изменяющегося фонового излучения позволяет улучшить точностные характеристики и расширить динамический диапазон импульсно-

го полупроводникового лазерного дальномера. Адаптивный порог формируется путем измерения текущего значения шумового напряжения, соответствующего реальным условиям работы устройства. При этом временная задержка сигнала, обуславливающая погрешность измерений, снижается за счет более раннего срабатывания компаратора и последующей динамической обработки данных в микропроцессоре. Окончательные результаты вычисления расстояния формируются с учетом введенных поправок, зависящих от уровня флуктуаций фонового излучения.

### Литература.

- [1] Малашин М.С., Каминский Р.П., Борисов Ю.Б. Основы проектирования лазерных локационных систем. — М.: Высш. школа, 1983. — 207 с.
- [2] Kilpeld A., Ylitalo J., Mõditta K., Kostamovaara J. Timing discriminator for pulsed time-of-flight laser rangefinder measurement // Review of Scientific Instruments. vol. 69, №5. 1998. pp. 1978-1984.
- [3] Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники. — Киев: Высш. школа. Главное издательство, 1988. — 383 с.
- [4] Быков М.М., Тюрин В.С., Тюрин С.В. Моделирование процесса формирования сигналов в импульсном полупроводниковом лазерном дальномере // Радиотехника и информатика. № 4 (35). 2006. — С. 11-15.

Поступила в редколлегию 24.02.2009



**Тюрин Владимир Сергеевич**, аспирант кафедры ФОЭТ, Харьковский национальный университет радиотехники. Область научных интересов: лазерная и оптоэлектронная техника, математическое моделирование, конструирование лазерных систем.



**Мачехин Юрий Павлович**, доктор технических наук, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заслуженный метролог Украины, академик академии наук прикладной радиотехники, заведующий кафедрой ФОЭТ ХНУРЭ. Область научных интересов: лазерная измерительная техника и оптоэлектронные приборы.