

УДК 621.3.087.5; УДК 621.384.3

## ОПТИМИЗАЦИЯ ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА ЛАЗЕРНОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

К.В. МЕЛЬНИКОВ

ООО «Лазеры и Информационные Технологии»  
Скорины, 14, Минск, 220114, Беларусь

Поступила в редакцию 16 мая 2012

Рассмотрены различные схематические решения построения каскадов преобразователей оптического сигнала в электрический. Проанализированы различные варианты построения схемы модуля фотоприемного устройства лазерной телеметрической системы. Представлено разработанное на основе предложенных алгоритмов оптимизации устройство приема оптических сигналов наносекундной длительности и его выходные параметры.

*Ключевые слова:* фотоприемное устройство, лавинный фотодиод, трансимпедансный усилитель.

### Введение

Системы лазерной телеметрии предназначены для обнаружения и определения местоположения различных объектов с помощью когерентного электромагнитного излучения оптического диапазона волн. В данной статье рассматриваются только импульсные телеметрические системы, базирующиеся на принципе постоянства скорости распространения лазерного излучения в однородной среде.

В данном случае, не затрагивая построения оптической части (приемного объектива) устройства обработки, рассмотрены основные параметры фотоприемного устройства, возможность их оптимизации и применение полученных результатов в целях практической реализации.

Фотоприемное устройство (ФПУ) является одним из основных модулей приемника оптических сигналов, в высокой степени определяющим параметры всей системы. Параметры чувствительности и уровень собственных шумов приемника оптических сигналов лазерной телеметрической системы практически определяются параметрами двух первых каскадов ФПУ – входного преобразователя оптического сигнала в электрический, и последующего каскада усиления, обычно выполняемого по схеме усилителя с временной автоматической регулировкой усиления (ВАРУ). Кроме того, на чувствительность приемного устройства влияет также метод принятия решения.

ФПУ (рис.1.) включает в себя: 1 – фотодетектор с предусилителем, 2 – усилитель ВАРУ, 3 – устройство принятия решения, 4 – формирователь выходного импульса; 5 – схема стабилизации питания фотодетектора, 6 – схему стабилизации температуры фотодетектора, 7 – усилитель шума ФПУ, 8 – детектор шума.

Входной каскад ФПУ предназначен для преобразования принятой энергии оптического диапазона в электрический сигнал. Усилитель со схемой ВАРУ предназначен для регулировки усиления оптического приемника в ближней зоне приема сигнала. Устройство принятия решения определяет с заданной вероятностью наличие цели на дистанции. Формирователь импульсов должен обеспечить минимальную погрешность в привязке фронта выходного импульса к сигналу, отраженному от цели, и сформировать импульс в требуемом для схемы измерителя временного интервала стандарте (напр. LVDS, LVTTTL и т.п.).

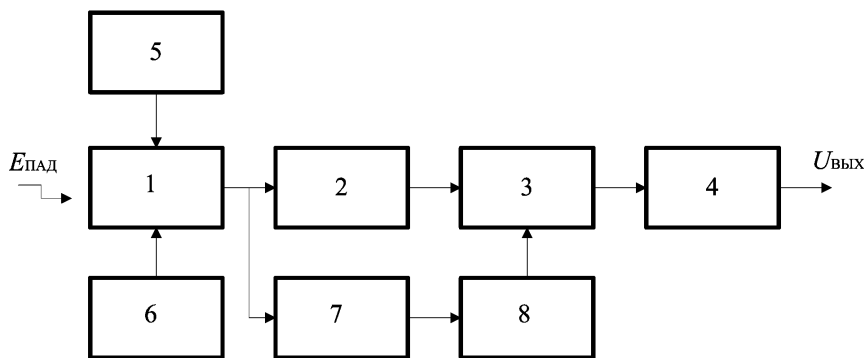


Рис.1. Структурная схема фотоприемного устройства

Основным элементом, определяющим чувствительность и шумовые параметры схемы, является входной преобразователь оптического сигнала в электрический. Определенный вклад в шумовые параметры также вносит следующий каскад – схема ВАРУ. Последующими каскадами усиления при рассмотрении этих параметров можно пренебречь.

В качестве детекторов светового излучения, преобразующих оптическую энергию, отраженную от цели, в электрический сигнал, в импульсных системах лазерной телеметрии можно использовать следующие устройства: лавинный фотодиод (ЛФД), *p-i-n* фотодиод и ФЭУ [1]. Для использования в скоростных фотоприемниках наиболее предпочтительными представляются первые два варианта – ЛФД и *p-i-n* фотодиоды. Варианты с применением ФЭУ далее не рассматриваются.

### Теоретический анализ усилительных и шумовых параметров фотоприемного устройства

В вопросе повышения чувствительности ФПУ мы сталкиваемся с очевидным противоречием между шириной полосы пропускания усилителя и уровнем его чувствительности.

Для его разрешения в системах определения дальности до цели используются схемы ФПУ, обладающие эффектом виртуального уменьшения емкости источника сигнала и/или нагрузочного сопротивления.

Это следующие схемы [2]: трансимпедансный усилитель (виртуальное уменьшение сопротивления нагрузки); усилитель с компенсацией входной емкости (виртуальное уменьшение емкости). Усилитель с высоким входным импедансом имеет ограничения полосы частот и низкую способность к перегрузке по уровню входного сигнала, поэтому не является оптимальным решением для рассматриваемого случая.

Последние достижения в разработке высокоскоростных операционных усилителей (ОУ) позволяют использовать обе предложенные выше схемы. Но, поскольку современные ЛФД и *p-i-n* фотодиоды имеют достаточно малую величину собственной емкости (порядка единиц пикофарад), использование схемы трансимпедансного усилителя (ТИУ), позволяющее регулировать нагрузочное сопротивление, выглядит наиболее предпочтительным.

При использовании лавинного фотодиода выходной ток фотодетектора определяется выражением [3]:

$$I_{\text{ФД}} = R_{\lambda}(1) \cdot M \cdot E_{\text{ПАД}}, \quad (1)$$

где  $M$  – коэффициент лавинного умножения;  $R_{\lambda}(1)$  – внутренняя чувствительность отклика ЛФД при усилении  $M = 1$  и длине волны  $\lambda$ ;  $E_{\text{ПАД}}$  – падающая оптическая мощность.

В рассматриваемом случае нагрузочным резистором цепи фототока является сопротивление цепи обратной связи трансимпедансного усилителя. Пороговая чувствительность ФПУ зависит от внутренних шумов компонентов электронной схемы. Полный шумовой ток схемы преобразователя оптической мощности в электрический сигнал может быть описан формулой

$$I_{\text{ш}\Sigma} = (i_{\text{шФД}}^2 + i_{\text{шУУ}}^2)^{1/2},$$

где  $i_{\text{шФД}}$  – шумовой ток фотодиода;  $i_{\text{шУУ}}$  – шумовой ток усилительного устройства (УУ).

Соотношение, определяющее величину шумового тока засвеченного ЛФД, будет выглядеть следующим образом [4]:

$$i_{шЛФД} = \left[ 2q(I_{DS} + I_{DB}M^2F + R_\lambda(1)M^2F E_{ПЛАД}) \Delta f \right]^{1/2},$$

где  $F = M^\chi$  – коэффициент избыточного шума ЛФД;  $\chi \approx 0,5$  для InGaAs ЛФД;  $\Delta f$  – ширина полосы частот системы;  $I_{DS}$  – ток утечки по поверхности;  $I_{DB}$  – ток утечки материала подложки;  $q$  – заряд электрона.

При использовании ТИУ в качестве усилительного устройства шумовой ток УУ может быть представлен, как [5]:

$$I_{шТИУ} = (i_{шОУ}^2 + i_{шR_{OC}}^2)^{1/2},$$

где  $i_{шОУ}$  – входной шумовой ток применяемого операционного усилителя (ОУ);  $i_{шR_{OC}}$  – шум резистора цепи обратной связи  $R_{OC}$ , который можно определить по формуле [3]

$$i_{шR_{OC}} = (4kT\Delta f / R_{OC})^{1/2},$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $R_{OC}$  – величина резистора цепи обратной связи.

Для сигнала в виде косинусоидального импульса полоса пропускания видеоусилителя, равная эффективной ширине спектра сигнала, описывается соотношением [6]

$$\Delta f = 1 / 2\tau_{ИМП},$$

где  $\tau_{ИМП}$  – длительность импульса по уровню 0,5, тогда полный шумовой ток всей схемы описывается выражением:

$$I_{ш\Sigma} = \left( \left( 2q(I_{DS} + (I_{DB}M^2 + R_\lambda(1)M^2E_{ПЛАД})F) + i_{шОУ}^2 \right) / 2\tau_{ИМП} + 4kT / 2\tau_{ИМП}R_{OC} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

Таким образом, полный шумовой ток схемы складывается из трех составляющих: шумовых токов ЛФД, резистора обратной связи и входного шумового тока ОУ. Отношение сигнал/шум для рассматриваемой схемы можно определить, как соотношение выражения (1) к выражению (2) следующим образом:

$$SNR = R_\lambda(1)ME_{ПЛАД} / [2q(I_{DS} + (I_{DB}M^2 + R_\lambda(1)M^2E_{ПЛАД})F) + i_{шОУ}^2] / 2\tau_{ИМП} + 2kT / \tau_{ИМП}R_{OC}]^{1/2}.$$

На основе полученной формулы проведена оптимизация схемы фотоприемника с предусилителем по выбору режима работы лавинного фотодиода – коэффициенту лавинного умножения. Результаты расчета представлены на рис. 2. Значения параметров, использованные при оптимизации:  $E_{ПЛАД} = 25$  нВт,  $R_\lambda(1) = 9,3$  А/В,  $M = 10$ ,  $I_{DS} = 18$  нА,  $I_{DB} = 0,85$  пА/(Гц)<sup>1/2</sup>,  $i_{шОУ} = 1,6$  пА/(Гц)<sup>1/2</sup>,  $\lambda = 1570$  нм,  $\tau_{ИМП} = 25$  нс,  $R_{OC} = 11$  кОм и 220кОм для полосы пропускания системы 25 МГц и 1 МГц соответственно.

Ошибка определения дистанции до объекта в системе, использующей косинусоидальный сигнал вида  $i(t) = [1 + \cos(\pi t / \tau)] I_0 / 2$  с порогом обнаружения, находящимся на уровне  $0,5I_0$ , где  $I_0 = R_\lambda(1)M^2E_{ПЛАД}$ , можно определить по формуле [7]:

$$\Delta L = \frac{(2 \cdot k_L \cdot \tau_{ИМП} / \pi) \left[ q \cdot (I_{DS} + (I_{DB} \cdot M^2 + R_\lambda(1) \cdot M^2 \cdot E_{ПЛАД}) F) + i_{шОУ}^2 \right] / \tau_{ИМП} + 2kT / \tau_{ИМП} R_{OC}}{R_\lambda(1) \cdot M \cdot E_{ПЛАД}}^{1/2}$$

где постоянная  $k_L = 150$  м/мкс.

Зависимость ошибки определения дистанции до цели от уровня отношения сигнал/шум на входе устройства принятия решения, показана на рис. 3.

Как следует из анализа семейства кривых (см. рис.3), точность определения положения цели  $\pm 1$  м для диапазона длительности импульса 20...30 нс достижима при невысоких отношениях сигнала к уровню шума.

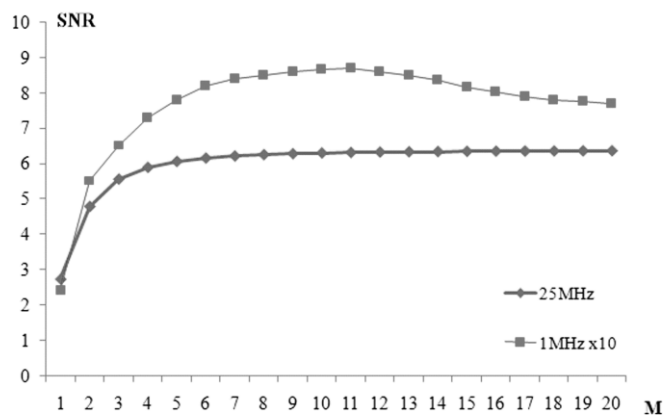


Рис.2. Зависимость отношения сигнал/шум на выходе ФПУ от величины коэффициента лавинного умножения  $M$

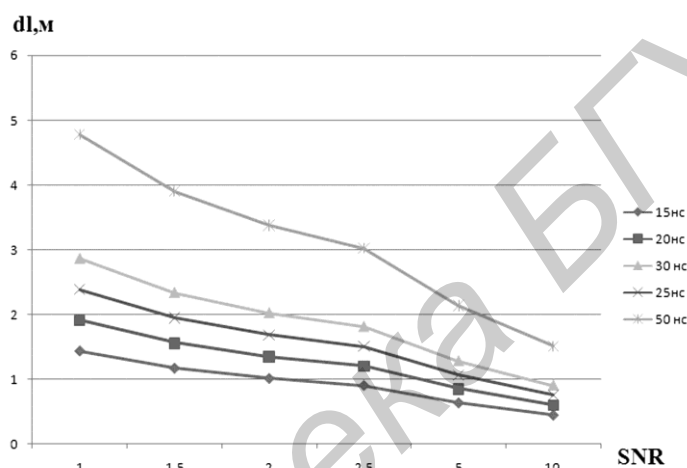


Рис.3. Зависимость ошибки определения дистанции до цели от величины отношения сигнал/шум на входе порогового устройства

### Обсуждение результатов оптимизации фотоприемного устройства

Процесс оптимизации схемы ФПУ был произведен по коэффициенту лавинного умножения ЛФД и длительности импульса на выходе ФПУ. Как видно из рис. 2, для системы с широкой полосой пропускания, использующей InGaAs ЛФД в качестве фотодетектора, кривая отношения сигнал/шум вырождается в монотонную функцию, в отличие от менее широкополосных систем, в которых имеется явный оптимум при величинах коэффициента лавинного умножения порядка 10.

Оптимизация схемы ТИУ по критерию максимизации отношения сигнал/шум проведена по критерию длительности импульса на выходе, позволяющему получить требуемое разрешение между целями и минимизировать ошибку определения дистанции. Определяющими факторами являются значение резистора  $R_{OC}$  схемы ТИУ и граничная частота ОУ.

Для определения чувствительности разработанного устройства был выбран метод сравнения разработанного устройства с тестовым модулем, имеющим известные параметры в требуемом диапазоне длин волн, в том числе аналогичный использованному тип ЛФД. В качестве источника оптического сигнала был использован имитатор, созданный на основе лазерного диода SFH495P с длиной волны выходного сигнала 890 нм, возбуждаемого генератором наносекундного импульса тока.

На рис. 4. представлены импульсы тока, протекающего через лазерный диод (кривая 2) и выходной оптический сигнал имитатора (кривая 1).

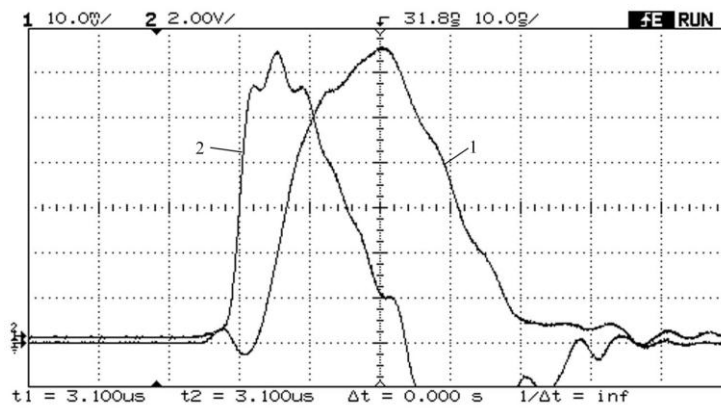


Рис.4. Ток через лазерный диод и выходной оптический импульс имитатора оптического сигнала

Для получения представленных в статье осциллограмм был использован осциллограф фирмы Agilent HP64325A. Для получения картины оптического импульса был использован фотодетектор DET210A фирмы Thorlabs, подключенный ко входу осциллографа 50 Ом.

Временные характеристики разработанного ФПУ представлены на рис. 5

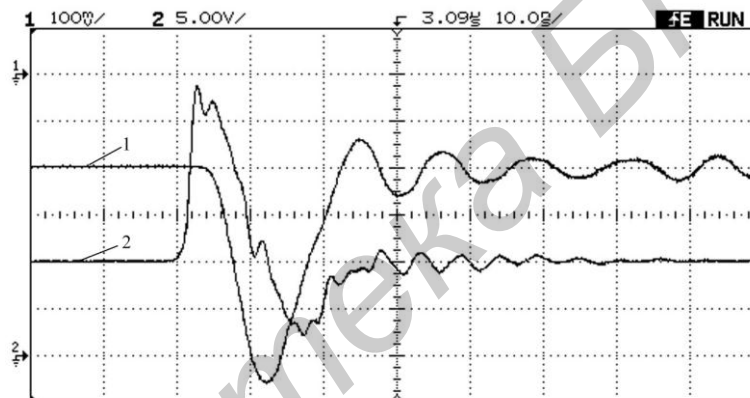


Рис.5. Выходной импульс ФПУ и ток через лазерный диод имитатора оптического сигнала

На рис. 5. кривая 1 – отклик на оптический импульс на выходе каскада трансимпедансного усилителя. На кривой 2 представлен токовый импульс, протекающий через лазерный диод схемы имитатора оптического импульса. Сравнение производится не с оптическим импульсом лазерного диода, а с токовым, что позволяет существенно упростить оптическую схему измерений.

Параметры разработанного фотоприемного устройства представлены в таблице.

**Параметры разработанного ФПУ**

Параметр	Значение параметра
Чувствительность, нВт, не хуже	15
Тип фотодетектора	InGaAs ЛФД
Рабочий диапазон длин волн, мкм	0,85...1,6
Напряжения питания устройства	+12 В, -12В, +90В
Диапазон регулировки ВАРУ, дБ	±38
Время выхода на режим максимальной чувствительности, мкс, не более	8
Вероятность регистрации входных сигналов при мощности засветки импульсного излучения $2,5 \times 10^{-8}$ Вт в режиме максимальной чувствительности, не менее	0,95
Вероятность ложной регистрации сигнала за время 150 мкс, не более	$1 \times 10^{-4}$
Габаритные размеры устройства, мм	25×40×70

## Заключение

Представлена сделанная на основании теоретического анализа процедура оптимизации параметров ФПУ системы лазерной импульсной телеметрии. Показано, что для системы с широкой полосой пропускания шумовые параметры ЛФД являются определяющими, при этом темновой неумножаемый ток фотодиода практически не влияет на уровень шумов. Представлена оценка зависимости величины ошибки измерения от соотношения сигнал/шум на выходе ФПУ. Приведены технические характеристики разработанного с применением вышеуказанной методики прототипа фотоприемного устройства на основе арсенидогаллиевого лавинного фотодиода. Проанализированы возможные варианты дальнейшего улучшения параметров представленного модуля ФПУ лазерной телеметрической системы.

## OPTIMIZATION OF A LASER TELEMETRIC SYSTEM PHOTORECEIVING MODULE

K.V. MELNIKOV

### Abstract

Different types of schematic solution to design optical-to-electronic signal transforming stages are considered. Possible alternatives for laser telemetric system photoreceiver module building are analyzed. Designed device based on presented algorithm nanosecond pulses photoreceiving is presented. Parameters of the photoreceiver module are given.

### Список литературы

1. Ставров А.А., Поздняков М.Г. // Докл. БГУИР. 2003. №1(2). С. 59–65.
2. Biryuchinskiy S., Melnikov K. // Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. 3rd International Congress. 2011. P. 801–804.
3. Johnson M. // Photodetection and Measurement: Maximizing Performance in Optical Systems. McGraw Hill Professional. New York, 2003. P. 45–82.
4. Фриман Р. // Волоконно-оптические системы связи. М., 2003.
5. Rieke G.H. // Detection of Light from the Ultraviolet to the Submillimeter. Cambridge University Press. New York, 2003.
6. Kingston R.H. // Optical sources, Detectors and Systems. Academic Press. San Diego, 1995. P.74–91.
7. Rosencher E., Vinter B. // Optoelectronics. Cambridge University Press. Cambridge, 2004.