

Сравнение методик расчета минимально обнаруживаемой энергии приемника при использовании ФЭУ в качестве фотодетектора

04, апрель 2014

УДК: 551.501

авторы: Иванов С. Е., Филимонов П. А., Белов М. Л., Городничев В. А.

Россия, МГТУ им. Н.Э.Баумана

ivanov_sergey2@mail.ru

ekomonit@bmstu.ru

belov@bmstu.ru

gorod@bmstu.ru

Введение

Одними из первых вопросов, которые решают при проектировании лазерных систем, являются определение энергетических характеристик принимаемых лазерных сигналов, пороговой мощности (энергии) приемника и потенциальной дальности работы лазерной системы (локации, зондирования, связи и т.п.) [1-3].

Дальность работы лазерной системы можно оценить из условия равенства (для предельной дальности) мощности полезного лазерного сигнала (приходящего на приемник) и пороговой мощности приемника лазерной системы.

Прием лазерного сигнала, в общем случае, производится на фоне шумов, которые ограничивают потенциальные возможности лазерной системы. Суммарная мощность шумов приемника лазерной системы определяется собственными шумами регистрирующей аппаратуры и внешними фоновыми помехами.

К фоновым помехам относят помехи, которые не связаны с излучением лазерного источника, а существуют независимо от наличия этого сигнала. К таким помехам в ультрафиолетовом (УФ), видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах прежде всего относят излучение, обусловленное рассеянием солнечной радиации в земной атмосфере и на земной поверхности. Эта помеха во многих случаях является определяющей при работе лазерных систем в дневное время [1-3].

В качестве фотодетектора для лазерных систем в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах во многих случаях выбирают фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), т.к. он обладает большой чувствительностью и небольшими собственными шумами.

На сегодняшний день существуют различные методики оценки энергетических характеристик приемником лазерных систем. В одних работах (см., например, [1,4,5]) используется понятие пороговой мощности приемника, которая сравнивается с мощностью полезного лазерного сигнала, в других (см., например, [6]) - понятие минимально обнаруживаемой энергии приемника, которая сравнивается с энергией регистрируемого лазерного сигнала. Причем существуют различные модификации этих методик, которые получены при разных условиях, используют разные характеристики приемника и т.п.

Данная статья посвящена сравнительному анализу методик расчета пороговой мощности (энергии) приемника при использовании ФЭУ в качестве фотодетектора.

1. Расчет пороговой мощности ФЭУ

Наиболее простая формула для пороговой мощности ФЭУ приведена, например, в [1]. При пуассоновской статистике сигнала и шума в условиях фонового излучения неба (рассеянного в атмосфере солнечного излучения) она имеет вид [1]

$$P_{п\partial} = \frac{\mu[2e(I_t + I_b)(1+B)\Delta f]^{\frac{1}{2}}}{S_k}, \quad (1)$$

где

μ - отношение сигнал/шум;

$e=1.6 \cdot 10^{-19}$ [А·с] – заряд электрона;

$(1+B) \cong 2.5$;

Δf – эффективная полоса частот фотоприемного устройства;

S_k – спектральная чувствительность фотокатода ФЭУ;

I_t – темновой ток фотокатода; так как в паспорте ФЭУ приведены значения темнового анодного тока I_{ta} , то значения I_t рассчитываются по формуле $I_t = \frac{I_{ta}}{M}$,

где M – коэффициент усиления ФЭУ ;

I_b - среднее значение тока, обусловленного солнечной засветкой.

Для приемника лидара с узким полем зрения и узкополосным спектральным фильтром выражение для I_b имеет вид [2,3]

$$I_b = K_r L_b S_r (\pi \alpha_r^2) S_k \Delta \lambda, \quad (2)$$

где

L_b - спектральная яркость фонового излучения;

S_r - площадь приемного объектива;

$\pi \alpha_r^2$ - телесный угол поля зрения приемной оптической системы ($2 \alpha_r$ - плоский угол поля зрения приемной оптической системы);

$\Delta \lambda$ - полоса пропускания спектрального фильтра.

Коэффициент пропускания оптической системы приемного канала определяется выражением $K_r = K_o K_f$, где K_o - коэффициент пропускания оптической системы без спектрального фильтра; K_f - коэффициент пропускания спектрального фильтра.

Более общая (чем (2)) формула (учитывающая тепловые шумы нагрузочного сопротивления ФЭУ) для порогового потока ФЭУ при регистрации переменного сигнала на уровне постоянной фоновой засветки приведена в [4] для отношения сигнал/шум равного 1. При произвольном отношении сигнал/шум μ эта формула имеет вид

$$P_{\text{пд}} = \frac{\mu [2eM^2 (I_t + I_b)(1+B)\Delta f + \frac{4kT\Delta f}{R_f}]^{\frac{1}{2}}}{S_a}, \quad (3)$$

где

M - коэффициент усиления ФЭУ;

S_a - анодная чувствительность ФЭУ;

R_f - нагрузочное сопротивление ФЭУ.

Учтя, что $M = \frac{S_a}{S_k}$ и пренебрегая тепловые шумы нагрузочного сопротивления

ФЭУ, получаем полное совпадение формул (1) и (3).

2. Расчет минимально обнаруживаемой энергии приемника

Другая методика расчета пороговой энергетической характеристики приемника основана на понятии минимально обнаруживаемой энергии приемника (см., например, [6]). Если фотодетектором является фотоэлектронный умножитель, то согласно этой методике для энергии импульса-сигнала $E_S(\lambda)$ за время детектирования τ_d имеем [6]

$$E_S(\lambda) = \frac{1}{2} \mu^2 E(\lambda) \left[1 + \left\{ 1 + \frac{4}{\mu^2} \left[\frac{E_b^T(\lambda)}{E(\lambda)} + \frac{i_d + i_j}{2eB^*} \right] \right\}^{1/2} \right] \quad (4)$$

или для минимально обнаруживаемой (пороговой) энергии

$$E_{Smin}(\lambda) = \frac{1}{2} \mu_{min}^2 E(\lambda) \left[1 + \left\{ 1 + \frac{4}{\mu_{min}^2} \left[\frac{E_b^T(\lambda)}{E(\lambda)} + \frac{i_d + i_j}{2eB^*} \right] \right\}^{1/2} \right], \quad (5)$$

где

$$E(\lambda) = \frac{hcF_G}{\lambda \eta(\lambda) \xi_e}; \quad E_b^T(\lambda) = E_b^N(\lambda) + v_\eta E_b^L(\lambda_L); \quad B^* = \frac{BF_G}{\xi_e}; \quad v_\eta = \frac{\lambda_L \eta(\lambda_L)}{\lambda \eta(\lambda)};$$

$$B = \frac{1}{2\tau_d}; \quad i_j = \frac{2kT}{eG^2 \xi_e R_{eq} F_G};$$

$E_b^N(\lambda)$ - импульс энергии естественного фона, пришедший на фотокатод за время детектирования τ_d ;

$E_b^L(\lambda_L)$ - импульс энергии рассеянного лазерного излучения, пришедший на фотокатод за время детектирования τ_d ;

$\eta(\lambda)$ - квантовый выход фотокатода на длине волны λ ;

λ_L - длины волны лазерного источника;

i_d - средний темновой ток фотокатода;

i_j - эффективный ток Джонсона;

G - усиление диодной цепи;

ξ_e - собирательная способность электростатической фокусировки ($\xi_e < 1$);

$F_G = \delta^2$; δ - учитывает флуктуации эмиссии вторичных электронов на диодах и может рассматриваться как параметр усиления шума ($\delta \approx 1$);

R_{eq} , T - эквивалентное сопротивление нагрузки выходной цепи и его абсолютная температура;

k постоянная Больцмана.

При большом значении шума фона
($E_b^T(\lambda) \gg \frac{i_d + i_j}{2eB^*} E(\lambda)$; $E_b^T(\lambda)E(\lambda) \gg \frac{1}{4} \mu_{min}^2 [E(\lambda)]^2$) формула (5) существенно упрощается [6] и преобразуется к виду

$$E_{Smin}(\lambda) = \mu_{min} \left[\frac{1}{2} \mu_{min} E(\lambda) + \{E_b^T(\lambda)E(\lambda)\}^{1/2} \right]. \quad (6)$$

Если пренебречь всеми составляющими шума кроме шума фона ($\{E_b^T(\lambda)E(\lambda)\}^{1/2} \gg \frac{1}{2} \mu_{min} E(\lambda)$) из (6) получим еще более простую формулу [6]

$$E_{Smin}(\lambda) = \mu_{min} \{E_b^T(\lambda)E(\lambda)\}^{1/2}. \quad (7)$$

Учтем, что $E(\lambda) = \frac{hcF_G}{\lambda\eta(\lambda)\xi_e}$, а $E_b^T(\lambda) \cong E_b^N(\lambda) = S_b(\lambda)K_o(\lambda)\Omega_o A_o \tau_d$. Тогда

формула (7) преобразуется к виду [6]

$$E_{Smin}(\lambda) = \mu_{min} \left\{ \frac{F_G hc K_o(\lambda) \Omega_o A_o \tau_d S_b(\lambda)}{\lambda \eta(\lambda) \xi_e} \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

где

$S_b(\lambda)$ - фоновая спектральная яркость неба;

$K_o(\lambda)$ - спектральная функция пропускания приемной системы, которую интерпретируют как эффективную спектральную ширину полосы пропускания;

Ω_o - телесный угол поля зрения приемника;

A_o - эффективная апертура приемника.

Полагая $\frac{F_G}{\xi_e} \approx 1$ [6] и учитывая, что $S_k = \frac{e\lambda\eta(\lambda)}{hc}$, $\Omega_o = \pi\alpha_r^2$; $S_b(\lambda) \equiv L_b$;

$K_o(\lambda) = \Delta\lambda$, получим, что формула (8) для минимально обнаруживаемой энергии $E_{Smin}(\lambda)$ совпадает с формулой для $P_{\ddot{u}\ddot{o}} \tau_d$, где пороговая мощность ФЭУ $P_{\ddot{u}\ddot{o}}$ определяется формулой (1) при условии $I_t \ll I_b$ и пренебрежения тепловыми шумами нагрузочного сопротивления ФЭУ.

3. Сравнение методик расчета минимально обнаруживаемой энергии приемника при использовании ФЭУ в качестве фотодетектора

В работе проводилась оценка минимально обнаруживаемой энергии по формулам (1) – (8).

Результаты расчетов зависимости минимально обнаруживаемой энергии E_{Smin} от отношения μ сигнал/шум представлены на рисунках 1 – 8 для длин волн излучения в УФ, видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах. На всех рисунках кривые 1-3 – это результаты расчетов по формуле (5) для эквивалентного сопротивления нагрузки выходной цепи 1 Ом, 1кОм и 1 Мом, соответственно; кривая 4 – результат расчетов по формуле (6); кривые 5,6 – по формулам (7) и (8), соответственно. Для расчета использовались параметры земной атмосферы и спектральной солнечной постоянной, приведенные в [2, 7], и характеристики ФЭУ из [8].

На рисунках 1-4 показаны результаты расчетов для длины волны 1,55 мкм (ближний ИК диапазон).

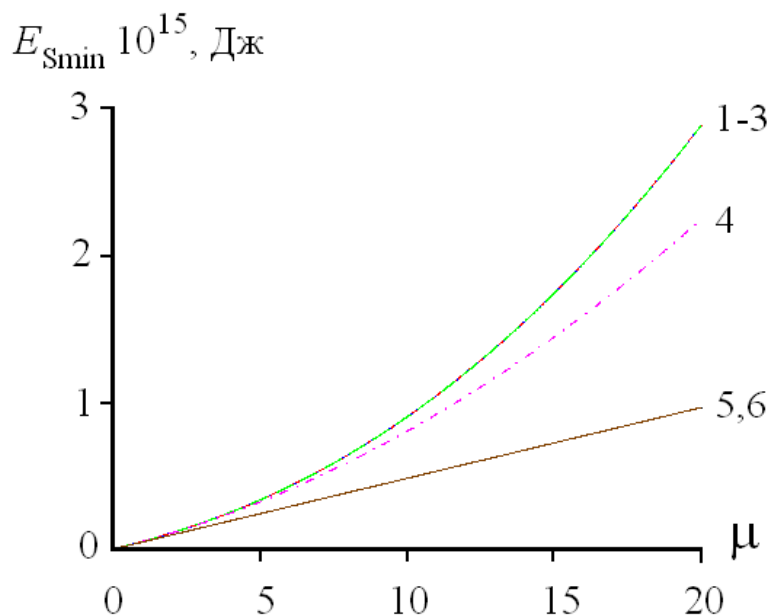


Рис.1 Зависимость минимально обнаруживаемой энергии от отношения сигнал/шум для длины волны 1,55 мкм: $\Delta\lambda = 10$ нм; $\tau_d = 2$ нс; $\alpha_r = 4$ мрад.

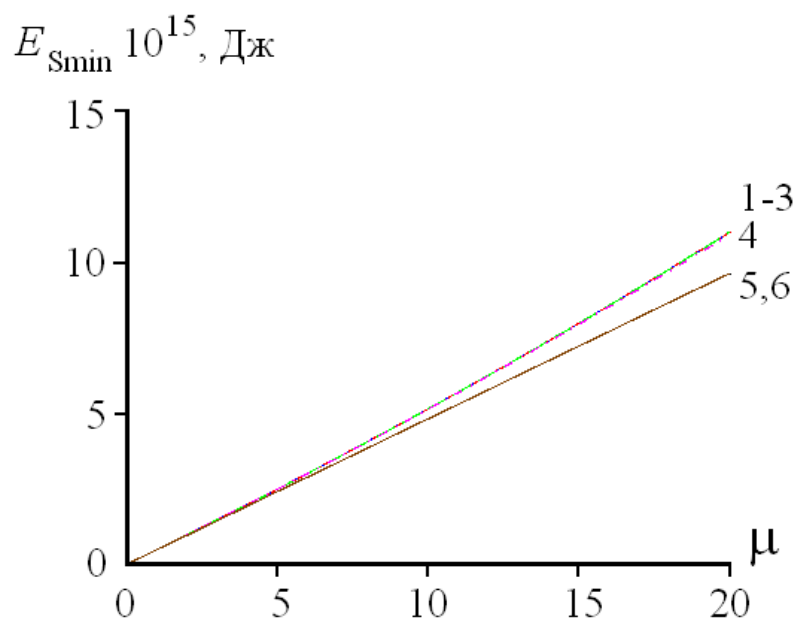


Рис.2 Зависимость минимально обнаруживаемой энергии от отношения сигнал/шум для длины волны 1,55 мкм: $\Delta\lambda = 10$ нм; $\tau_d = 2$ нс; $\alpha_r = 40$ мрад.

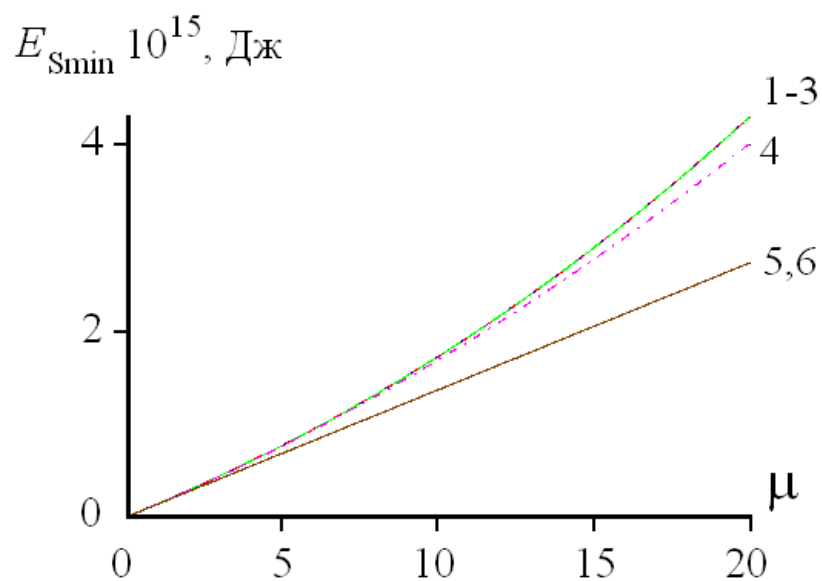


Рис.3 Зависимость минимально обнаруживаемой энергии от отношения сигнал/шум для длины волны 1,55 мкм: $\Delta\lambda = 80$ нм; $\tau_d = 2$ нс; $\alpha_r = 4$ мрад.

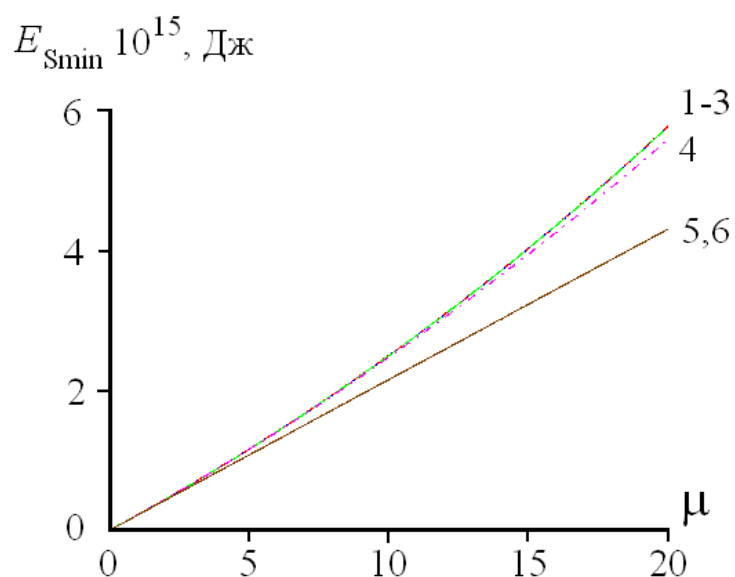


Рис.4 Зависимость минимально обнаруживаемой энергии от отношения сигнал/шум для длины волны 1,55 мкм: $\Delta\lambda = 10$ нм; $\tau_d = 40$ нс; $\alpha_r = 4$ мрад.

На рисунке 1 представлены результаты расчетов минимально обнаруживаемой энергии ФЭУ для достаточно узкого спектрального фильтра (10 нм), узкого поля зрения приемника (4 мрад) и сравнительно небольшого времени детектирования (2 нс) (эти условия обеспечивают небольшое значение энергии фонового излучения, регистрируемого приемником). Из рисунка 1 хорошо видно, что результаты расчетов по формулам (5) – (8) для ближнего ИК диапазона могут сильно отличаться. Причем это отличие тем больше, чем больше отношение сигнал/шум.

При увеличении ширины спектрального фильтра (рисунок 2), поля зрения приемника (рисунок 3) или времени детектирования (см. рисунок 4) увеличивается энергия фонового излучения, регистрируемого приемником, и как следствие - минимально обнаруживаемая энергия ФЭУ (это хорошо видно из рисунков 2-4). При этом разница в результатах расчетов по формулам (5) – (8) уменьшается.

Аналогичные результаты показывают расчеты в видимом диапазоне для длины волны 0,53 мкм (рисунки 5,6).

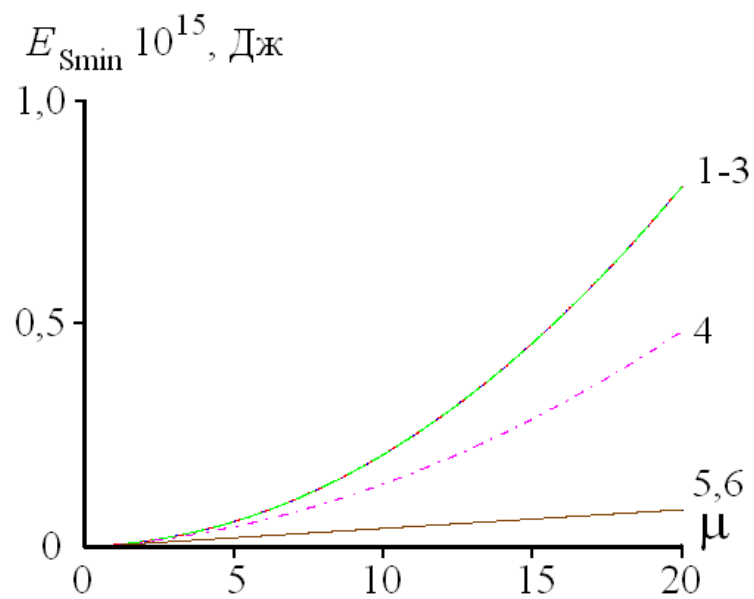


Рис.5 Зависимость минимально обнаруживаемой энергии от отношения сигнал/шум для длины волны 0,53 мкм: $\Delta\lambda = 0,1$ нм; $\tau_d = 1$ нс; $\alpha_r = 4$ мрад.

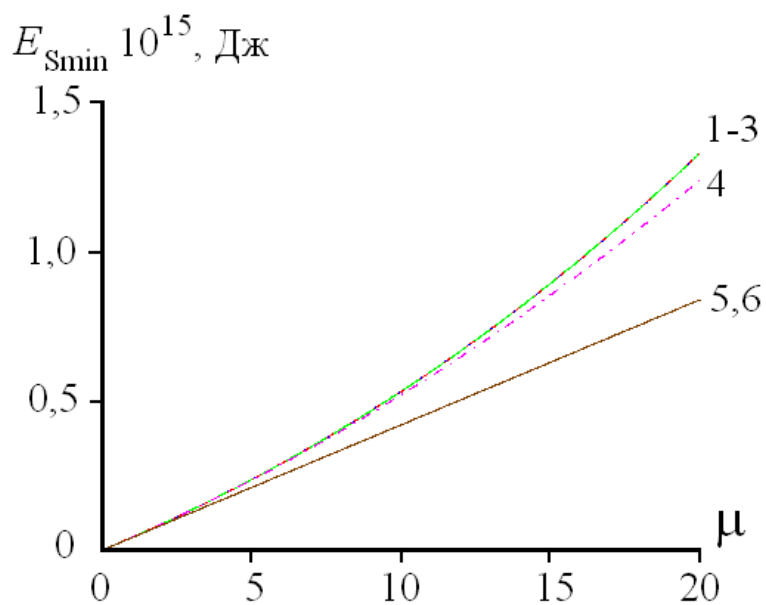


Рис.6 Зависимость минимально обнаруживаемой энергии от отношения сигнал/шум для длины волны 0,53 мкм: $\Delta\lambda = 10$ нм; $\tau_d = 1$ нс; $\alpha_r = 4$ мрад.

На рисунке 5 представлены результаты расчетов минимально обнаруживаемой энергии ФЭУ для длины волны 0,53 мкм при достаточно узком спектральном фильтре (0,1 нм), узком поле зрения приемника (4 мрад) и сравнительно небольшом времени детектирования (1 нс). Для этих условий из рисунка 5 хорошо видно, что результаты расчетов по формулам (5) – (8) для видимого диапазона могут сильно отличаться (и тем больше, чем больше отношение сигнал/шум).

При увеличении ширины спектрального фильтра (рисунок 6) увеличивается энергия фонового излучения, регистрируемого приемником, и как следствие – увеличивается минимально обнаруживаемая энергия ФЭУ и уменьшается разница в результатах расчетов по формулам (5) – (8).

На рисунке 7 представлены результаты расчетов минимально обнаруживаемой энергии ФЭУ в УФ диапазоне для длины волны 0,355 мкм при $\Delta\lambda = 1$ нм; $\tau_d = 1$ нс; $\alpha_r = 4$ мрад.

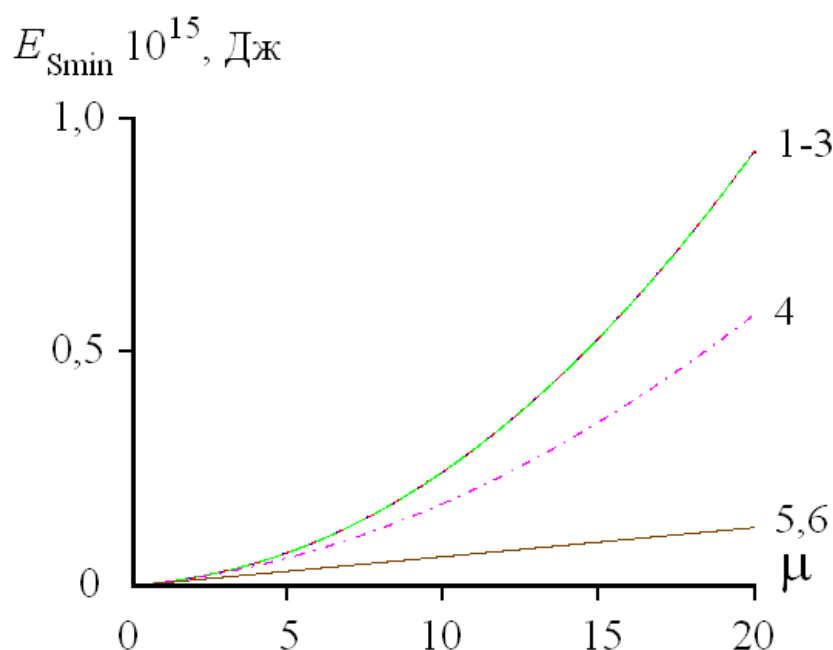


Рис.7 Зависимость минимально обнаруживаемой энергии от отношения сигнал/шум для длины волны 0,355 мкм: $\Delta\lambda = 1$ нм; $\tau_d = 1$ нс; $\alpha_r = 4$ мрад.

Из рисунка 7 (для указанных параметров приемной системы, при которых обеспечивается небольшое значение энергии фонового излучения, регистрируемого

приемником) хорошо видно, что результаты расчетов по формулам (5) – (8) могут сильно отличаться.

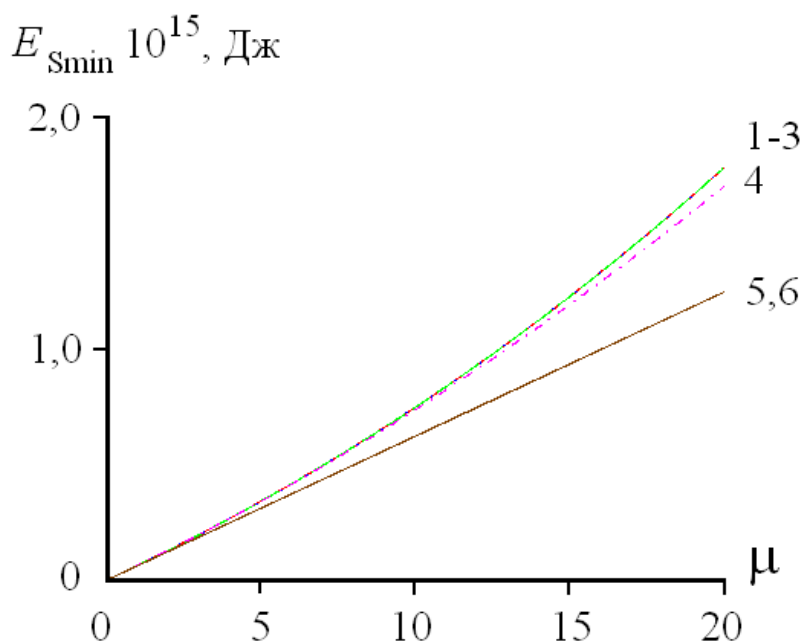


Рис.8 Зависимость минимально обнаруживаемой энергии от отношения сигнал/шум для длины волны 0,355 мкм: $\Delta\lambda = 1$ нм; $\tau_d = 1$ нс; $\alpha_r = 40$ мрад.

На рисунке 8 приведены результаты расчетов в УФ диапазоне для длины волны 0,355 мкм, но для большого поля зрения приемной оптической системы (40 мрад). При увеличении поля зрения приемник увеличивается энергия фонового излучения, регистрируемого приемником, и как следствие (как и для видимого и ближнего ИК диапазонов) - увеличивается минимально обнаруживаемая энергия ФЭУ и уменьшается разница в результатах расчетов по разным методиках минимально обнаруживаемой энергии (что хорошо видно на рисунке 8).

Заключение

Результаты расчетов минимально обнаруживаемой энергии ФЭУ в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах могут сильно отличаться для разных методик. Причем отличие тем больше, чем больше отношение сигнал/шум. При увеличении

ширины спектрального фильтра, поля зрения приемника или времени детектирования увеличивается энергия фонового излучения, регистрируемого приемником, и как следствие - минимально обнаруживаемая энергия ФЭУ. При этом уменьшается разница в результатах расчетов по разным методикам минимально обнаруживаемой энергии ФЭУ.

Список литературы

1. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов, В.А. Городничев, Б.В.Стрелков. М.: Изд-во МГТУ, 2002. Издание 2-е дополненное. 528 с.
2. Основы импульсной лазерной локации / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов, В.А. Городничев, Б.В.Стрелков. М.: Изд-во МГТУ, 2010. Издание 2-е дополненное. 572 с.
3. Сигналы и помехи в лазерной локации / В.М.Орлов, И.В.Самохвалов, Г.М.Креков, В.Л. Миронов, Ю.С. Балин, В.А. Банах, М.Л. Белов, Ю.Д. Копытин, В.П. Лукин. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
4. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В. Источники и приемники излучения. СПб.: Политехника, 1991. 240 с.
5. Лазерная диагностика и спектроскопия. Режим доступа: <http://www.rfe.by/elib/education/download/lazernaja-diagnostika/tema10.pdf> (дата обращения 20.03.2014).
6. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
7. Козинцев В.И., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Расчет яркости фона и ослабления лазерного излучения в ультрафиолетовой области спектра. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 66 с.
8. Hamamatsu. Режим доступа: <http://jp.hamamatsu.com/resources/products/> (дата обращения 20.03.2014).