

**КРУТИК Михаил Ильич,
МАЙОРОВ Виктор Петрович**

ЛЮМЕНЫ, КАНДЕЛЫ, ВАТТЫ И ФОТОНЫ. РАЗЛИЧНЫЕ ЕДИНИЦЫ – РАЗЛИЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ КАМЕР НА ОСНОВЕ ЭОП И ПЗС

Авторы этой статьи по роду своей деятельности очень часто сталкиваются с некоторой путаницей в головах наших партнеров и заказчиков в части чувствительности ПЗС-камер.

В представленной статье рассматривается метод оценки чувствительности телевизионных систем (в том числе и импульсных) с использованием энергетических единиц измерения оптического излучения (джоули, ватты, фотоны). По мнению авторов при регистрации изображений данный метод достаточно универсален и применим во всем оптическом спектре излучения. В отличие от этого, метод расчета, основанный на светотехнических единицах (Кандела, Люмен, Люкс), строго применим только в пределах видимого диапазона. Приведены некоторые примеры энергетических расчетов, которые помогут читателю самому убедиться в простоте метода и однозначности получаемых результатов.

Из множества существующих телевизионных систем в статье рассматриваются только камеры на ПЗС, в том числе и с предварительными каскадами усиления изображения на электронно-оптических преобразователях (ЭОП). Рассматриваемый метод, может быть, применим как для стандартного телевизионного режима (режима непрерывного накопления), так и для импульсного (в том числе и однократного).

Чтобы при ознакомлении с последующим материалом не возникало вопросов о корректности применяемых положений, ниже приводятся основные определения из фотометрии и радиометрии.

Измерением световых величин занимается **фотометрия**, а измерениями излучения во всем оптическом диапазоне – **радиометрия**. В соответствии с этим световые единицы часто называют фотометрическими, а энергетические единицы – радиометрическими. Соответствие фотометрических и радиометрических единиц приведено в табл. 1. Нижний индекс **e** при соответствующих величинах обозначает их энергетический характер, а индекс **v** – фотометрический. Из всей огромной области оптической области излучения (10 нм - 1 мм) лишь узкая полоса спектра от 380 до 780 нм (световое излучение) может восприниматься человеческим глазом.

Вся метрология в видимой области спектра основана на глазе стандартного фотометрического наблюдателя, чувствительность которого к световому излучению функционально зависит от длины волны. Эта функция $V(\lambda)$ называется “спектральная световая эффективность” $V(\lambda)$. Ее графический вид представлен на рис. 1, а табличный – в табл. 2 [1].

[Таблица 1. Основные энергетические и световые величины \(в соответствии с системой СИ и Международным светотехническим словарем\)](#)

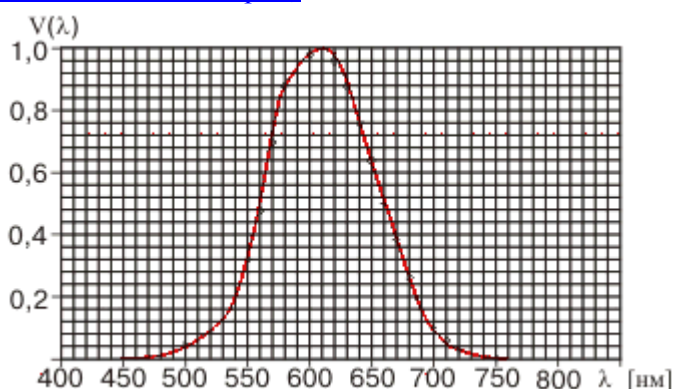


Рис. 1. Спектральная световая эффективность

Таблица 2. Зависимость относительной спектральной эффективности от длины волны излучения

l , нм	V(l)	l , нм	V(l)	l , нм	V(l)	l , нм	V(l)
--------	------	--------	-------	--------	------	--------	------

380	0,00004	480	0,139	580	0,870	690	0,0082
390	0,00012	490	0,208	590	0,757	700	0,0041
400	0,00040	500	0,323	600	0,631	710	0,0021
410	0,0012	510	0,503	610	0,503	720	0,00105
420	0,0040	520	0,710	620	0,381	730	0,00052
430	0,0116	530	0,862	630	0,265	740	0,00025
440	0,023	540	0,954	640	0,175	750	0,00012
450	0,038	550	0,995	650	0,107	760	0,00006
460	0,060	555	1,0000	660	0,061	770	0,00003
470	0,091	560	0,995	670	0,032		
		570	0,952	680	0,017		

λ – длина волны излучения в нанометрах;

$V(\lambda)$ – значения относительной спектральной эффективности при заданном значении λ

Исторически сложилось так, что сначала развивалась метрология световых измерений. Именно глаз на протяжении более 200 лет был тем самым эталонным приемником излучения, на основе которого и проводились все оценки и измерения силы света, яркости и освещенности. Впоследствии был создан прибор для измерения освещенности (люксметр), который имеет спектральную характеристику, совпадающую со спектральной характеристикой глаза стандартного наблюдателя.

Телевизионные камеры на ПЗС-матрицах и ЭОП имеют спектральные характеристики, значительно отличающиеся от спектральной эффективности глаза. Их диапазон может простирается от ультрафиолетового (120 нм для ЭОП) до инфракрасного (1мкм для ЭОП и ПЗС). Применение данных приборов в условиях, когда на их вход поступает излучение более широкого спектра, чем видимое, приводит к тому, что показания люксметра (измеряющего излучение только видимого диапазона) не несут практически никакой достоверной информации. В статье будет приведен расчет, который показывает, что для 1/2" матрицы ПЗС-камеры рекламируемая освещенность в 0,0003 лк соответствует энергетической экспозиции на одну ячейку данной матрицы менее 1 фотона.

Для качественного объяснения таких ошибок рассмотрим пример использования в ночных условиях низкоуровневой телевизионной камеры с каскадом усиления изображения на ЭОП с арсенид-галиевым фотокатодом.

На рис. 2 представлены относительные спектральные характеристики:

- излучения ночного свода (кривая 3) [2];
- чувствительности арсенид-галиевого фотокатода ЭОП (кривая 2);
- чувствительности глаза человека и совпадающую с ней чувствительности прибора, измеряющего освещенность – люксметра (кривая 1);
- чувствительности ПЗС-матрицы ICX249 фирмы SONY (кривая 4).

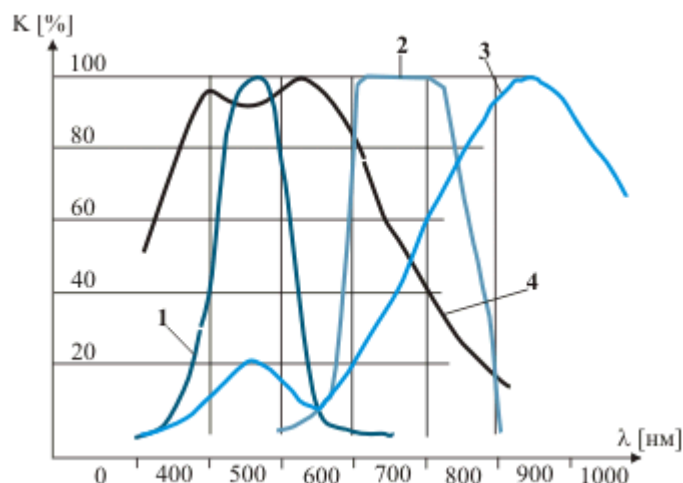


Рис. 2. Относительные спектральные характеристики: различных фотозлектронных приемников (1, 2, 4); излучения безлунного ночного небосвода (3).

Из приведенных графиков видно, что в условиях безлунной ночи мощность инфракрасного излучения ночного свода ($\lambda \geq 760$ нм) значительно превышает его мощность излучения в видимом диапазоне. Люксметр при этом измеряет только видимую очень незначительную часть всего потока излучения. Она сосредоточена в диапазоне 400 – 700 нм. В отличие от него фотокатод ЭОП чувствует оптическое излучение в диапазоне 500 – 900 нм и “работает” с большим потоком. Аналогичные выводы получаются при применении в тех же условиях телевизионной ПЗС-камеры, кремниевый кристалл которой так же имеет хорошую чувствительность в инфракрасном диапазоне до 1 мкм (кривая 4).

Из всего выше изложенного можно сделать вывод, что для телевизионных систем, обладающих спектральными характеристиками, отличными от спектральной чувствительности глаза, применение светотехнических единиц (Люкс, Люмен и т.п.) не совсем корректно (корректно, но не совсем или совсем некорректно – выбор за читателем).

Метод оценки и расчета чувствительности телевизионных систем в энергетических единицах (Ватт, Джоуль, количество фотонов) свободен от указанных недостатков.

Приведем основные определения и константы.

Принятое в 1948 году и действовавшее до 1979 года определение Канделы звучало следующим образом:

Кандела – сила света, излучаемого в перпендикулярном направлении $1/600\,000$ м² поверхности черного тела при температуре затвердевания платины (2042 К) и давлении 101325 Н/м².

Различные эксперименты давали результаты, которые показали, что на длине волны $\lambda = 555$ нм излучение в 1 Вт соответствует световому потоку в 676 - 688 лм. Это соотношение уже тогда давало возможность пересчитывать люмены в ватты и обратно, хотя у оппонентов оставались сомнения в корректности применяемого метода. В 1979 году на 16-й Генеральной конференции по мерам и весам было принято новое определение канделы [3].

Кандела – сила света в данном направлении от источника монохроматического излучения с частотой 540×10^{12} Гц и имеет интенсивность излучения в этом направлении, равную $1/683$ Вт в телесном угле равном одному стерadianу.

Частота излучения 540×10^{12} Гц соответствует длине волны $\lambda = 555,016$ нм в воздухе при стандартных условиях, которая почти для всех целей может быть взята равной 555 нм без влияния на точность реальных измерений.

На основе данного фундаментального определения можно однозначно переводить фотометрические единицы в радиометрические и обратно.

Еще одно (и последнее), что нам необходимо – формула расчета энергии кванта. Дело в том, что во многих случаях энергетический расчет удобнее делать не в интегральных величинах (ватт, джоуль и их производные), а в количествах фотонов (в единицу времени, на единицу площади и т.п.). В частности, уже многие и разработчики ПЗС-камер и квалифицированные пользователи оценивают их чувствительность по числу электронов в ячейке (другими словами, по числу квантов). Поэтому представляет определенный интерес расчет всего фотозлектронного комплекса (входной объектив + ЭОП + проекционный объектив + ПЗС-камера) на основе квантовой природы

света. Тем более что такой расчет очень удобен при импульсном режиме облучения регистрируемого изображения (в том числе и однократном).

Энергия кванта излучения (фотона) вычисляется по известной формуле:

$$Q = (h * c) / l, (1)$$

где c – скорость света в вакууме ($2,998 \times 10^8$ м/с);

h – постоянная Планка ($6,6262 \times 10^{-34}$ Дж*с);

l – длина волны излучения (м).

Энергия кванта излучения при $l_1 = 555$ нм соответственно равна:

$$Q(l_1) = 3,58 \times 10^{-19} \text{ Дж} (2)$$

Обратная величина соответствует числу квантов за секунду в излучении мощностью 1 Вт при $\lambda_1 = 555$ нм:

$$N_{ph [1Вт]}(l_1) = 1/Q(l_1) = 1 / 3,58 \times 10^{-19} = 2,79 \times 10^{18} \text{ фот/с} (3)$$

Нижний индекс ph означает, что речь идет о фотонных величинах.

Из определения канделы следует, что при $\lambda_1 = 555$ нм

$$N_{ph [1Вт]}(l_1) = 683 \text{ лм.} (4)$$

Следовательно, можно получить точное значение числа фотонов при $\lambda_1 = 555$ нм за секунду в световом потоке, равном 1/683 Вт, что на данной длине волны соответствует световому потоку в 1 лм:

$$N_{ph [1лм]}(l_1) = N_{ph [1Вт]}(l_1) / 683 = 0,409 \times 10^{16} \text{ фот /с} (5)$$

Используя определение единицы освещенности, находим, что при $\lambda_1 = 555$ нм число фотонов, падающих за 1 секунду на поверхность в 1 м^2 при освещенности в 1 лк, равно:

$$N_{ph [1лк]} = N_{ph [1лм]} / \text{м}^2 = 0,409 \times 10^{16} \text{ фот / (с*м}^2) (6)$$

Теперь можно показать, почему применение светотехнических единиц (люмен, люкс и т.п.) в расчете чувствительности телевизионных систем часто дает ошибочные результаты.

Для этого приводится сравнительный расчет среднего числа электронов в ячейке ПЗС-матрицы при ее облучении одной и той же мощностью при двух различных длинах волн: $\lambda_1 = 555$ нм и $\lambda_2 = 630$ нм. Показания люксметра при этом будут наглядной демонстрацией доказываемого утверждения. Как указывалось выше, его относительная спектральная характеристика аналогична относительной спектральной световой эффективности глаза стандартного фотометрического наблюдателя (рис. 1, табл. 2).

Для упрощения вычислений поток излучения Φ_{el} примем равным:

$$\Phi_{el} = 1 / 683 \text{ Вт.}$$

При $\lambda_1 = 555$ нм такой поток излучения соответствует световому потоку

$$\Phi_{vl} = 1 \text{ лм.}$$

При условии, что заданный поток падает на площадь в 1 м^2 , облученность, поверхности ПЗС-матрицы составит

$$E_{el} = (1 / 683) \text{ Вт/м}^2,$$

что соответствует освещенности

$$E_{vl} = 1 \text{ лк.}$$

Это значение освещенности при $\lambda_1 = 555$ нм и покажет люксметр.

Теперь рассчитывается среднее число электронов, генерируемые в ячейке ПЗС-матрицы при облучении ее заданным потоком. В качестве примера взята ПЗС-матрица фирмы SONY – ICX249. Это 1/2-дюймовая матрица с характеристиками:

$H*V$ – размер активной части кристалла	6,47 x 4,83 мм;
P – число активных пикселей	752 x 582;
$h*v$ – размер пикселя	8,6 x 8,3 мкм;
относительная спектральная характеристика	(рис. 2, кривая 4);
h_1 – квантовая эффективность матрицы (при $\lambda_1 \sim 555$ нм)	$\sim 0,6$;
h_2 – квантовая эффективность матрицы (при $\lambda_2 \sim 630$ нм)	$\sim 0,7$;
t_n – время накопления.	20 мс

Из приведенных выше расчетов (формулы (1) - (6)) получили, что при $\lambda_1 = 555$ нм облученности E_{el} соответствует поверхностная плотность фотонов

$$N_{ph1}(l_1) = 0,409 \times 10^{16} \text{ фот / (с*м}^2\text{)}$$

Из вычисленной площади пикселя матрицы:

$$S_{pix} = 8,6 \times 8,3 \times 10^{-12} = 7,14 \times 10^{-11} \text{ м}^2, (7)$$

и заданного времени накопления $t_n = 20$ мс определяется число фотонов (при $\lambda_1 = 555$ нм), падающих на пиксель матрицы за указанное время:

$$N_{ph1-pix}(l_1) = N_{ph1}(l_1) \times S_{pix} \times t_n = 5,84 \times 10^3 \text{ фот}$$

Квантовая эффективность матрицы ICX249 при $\lambda_1 = 555$ нм примерно равна 0,6 (рис. 2, кривая 4).

Таким образом, при облученности $\lambda_1 = 555$ нм поверхности ПЗС-матрицы, равной $E_{el} = (1/683)$ Вт/м², среднее число электронов, накопленных в одном пикселе за $t_n = 20$ мс, равно

$$N_{[el]1-pix} = N_{ph1-pix}(l_1) \times 0,6 = 3,36 \times 10^3 \text{ el}, (8)$$

где нижний индекс [el] означает, что речь идет о количестве электронов.

Теперь рассчитывается среднее число электронов в ячейке при той же облученности в $1/683$ Вт/м², но при $\lambda_2 = 630$ нм.

Из (1) находим энергию кванта:

$$Q(l_2) = 3,15 \times 10^{-19} \text{ Дж} (9)$$

Число фотонов в потоке мощностью в 1 Вт за 1 секунду при $\lambda_2 = 630$ нм соответственно равно

$$N_{ph[1Вт]}(l_2) = 1 / Q(l_2) = 3,17 \times 10^{18} \text{ фот / с}, (10)$$

а в потоке мощностью в $1/683$ Вт соответственно

$$N_{ph[1/683Вт]}(l_2) = (3,17 \times 10^{18}) / 683 = 0,46 \times 10^{16} \text{ фот / с}. (11)$$

При условии, что данный поток падает на площадь, равную 1 м², соответствующая плотность фотонов (фотонная освещенность) равна

$$N_{ph2}(l_2) = 0,46 \times 10^{16} \text{ фот / (с*м}^2\text{)} (13)$$

Умножая полученное значение на площадь ячейки матрицы S_{pix} (7) и время накопления t_n , находим число фотонов (при $\lambda = 630$ нм), падающих на пиксель за указанное время

$$N_{ph2-pix}(l_2) = N_{ph2}(l_2) \times S_{pix} \times t_n = 6,625 \times 10^3 \text{ фот} (14)$$

Квантовая эффективность матрицы ICX249 при $\lambda = 630$ нм примерно равна 0,7 (рис. 2, кривая 4). В результате получаем, что среднее число электронов, накопленных в одной ячейке за 20 мс, равно

$$N_{[el]2-pix} = N_{ph2-pix}(l_2) \times 0,7 = 4,64 \times 10^3 \text{ el}. (15)$$

Необходимо напомнить, что на длине волны $\lambda = 555$ нм энергетической облученности в $1/683$ Вт соответствует освещенность в 1 лк, а на длине волны $\lambda = 630$ нм той же облученности соответствует освещенность в 0,265 лк. Это следует из спектральной световой эффективности (рис. 1, табл. 2).

Таким образом, в энергетических единицах (Вт) чувствительность матрицы ICX249 на длине волны $\lambda = 630$ нм примерно в 1,4 раза больше, чем на $\lambda = 555$ нм. Но в световых единицах (лк) на этой же длине волны ее чувствительность больше уже в 5,3 раза (в попугаях удав оказался значительно длиннее).

Сведем полученные результаты (формулы (6), (8), (13) и (15)) в табл. 3. При освещенности на поверхности матрицы, равной 10^{-2} лк ($\lambda = 555$ нм), в каждом пикселе формируется сигнальный заряд, равный 35 электронам. В таком случае, что может означать указанная производителем чувствительность 0,0003 лк для CCD камеры WAT-902H, в которой установлена матрица ICX249? При такой освещенности за время накопления в 20 мс на ячейку приходит в среднем 1 – 2 фотона, что дает в среднем менее 1 электрона на пиксель.

Из табл. 3 видно, что для формирования в ПЗС-матрице сигнала, равного собственному шумовому уровню электронов в ячейках, освещенность на ее поверхности должна быть не менее 10^{-2} лк.

То, что многие ПЗС-камеры рекламируют для работы при значительно более низких освещенностях, говорит только об их хорошей чувствительности в инфракрасной области. Но к люксам это уже не имеет отношения.

Представленный метод оценки энергетической чувствительности фотоприемников приведен только для монохроматического излучения. Оценка чувствительности ПЗС или ЭОП при работе с некогерентными источниками излучения требует обязательного знания как спектральных характеристик фотоприемников, так и спектрального состава излучения. Расчет представляет собой своеобразную свертку этих двух функций. На практике чаще всего такая свертка осуществляется графически. Разделяя весь спектральный диапазон на интервалы, в пределах которого с допустимой погрешностью можно считать значение мощности излучения источника и квантовой эффективности фотоприемника постоянными, выполняется расчет для каждого из интервалов. Затем полученные результаты суммируются.

Таблица 3. Результаты расчетов

Литература

1. М.И. Эпштейн. Измерения оптического излучения в электронике. "Энергия", 1975.
2. В.А. Орлов, В.И. Петров. Приборы наблюдения ночью при ограниченной видимости. М. Военное издательство, 1989.
3. NIST Special Publication SP330 "The International System of Units (SI)." The US edition of the above BIPM publication