

ШУМОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ

© 2012 г. В. И. Федосеев, доктор техн. наук

Научно-производственное предприятие “Геофизика-Космос”, Москва

E-mail: coop@geofizika-cosmos.ru

Рассматриваются особенности различных параметров матричных фотоприемников (МФП), характеризующие их шумовые свойства. Отмечается, что интегральная чувствительность, выраженная в количестве электронов в секунду на люмен, и интенсивность внутренних шумовых электронов, выраженная в количестве электронов в секунду с единицы площади и приведенная к единому времени накопления и единому времени считывания, являются объективными показателями МФП при работе с малыми освещенностями вне зависимости от размеров пиксела, времени накопления, времени считывания. При проектировании аппаратуры с МФП для корректного выбора времени накопления и времени считывания необходимо знать также основные составляющие приведенной интенсивности внутренних шумов МФП (или приведенной пороговой экспозиции) – дробовую и тепловую, поскольку эти составляющие по-разному изменяются при изменении вышеуказанных временных параметров.

Ключевые слова: матричные фотоприемники, шумовые параметры, внутренние шумы приемников.

Коды OCIS: 070.4560, 070.6110, 200.3050.

Поступила в редакцию 17.02.2012.

1. Введение

Фотоприемники, используемые при малых уровнях освещенности, должны обладать малой величиной собственных шумов, вносимых при преобразовании света в электрический сигнал. Для описания шумовых свойств матричных фотопреобразователей (МФП) с накоплением заряда разные производители используют различные параметры – среднее квадратическое отклонение выходного сигнала (темнового и светового), количество шумовых электронов, пороговую освещенность, пороговую экспозицию. Использование последних двух параметров предписывается стандартом [1]. Режимы работы приемников при контроле параметров также отличаются. Кроме этого, возможности того или иного МФП по приему слабых оптических сигналов определяются как численными значениями указанных шумовых параметров, так и другими параметрами – размерами пиксела матрицы, временем накопления, частотой считывания информации, а также применяемыми алгоритмами обработки сигналов. При проектировании аппаратуры с МФП проектировщик должен выбрать конкретный

тип приемника, для чего необходимо иметь возможность сравнивать различные приемники по единому набору параметров, характеризующих эффективность решения задачи приема сигналов при малых освещенностях. Целью настоящей работы является определение указанного набора параметров с учетом особенностей решения типовых задач приема слабых оптических сигналов.

2. Внутренние шумы приемников и типовые задачи приема оптических сигналов

Прием сигналов в оптико-электронных системах всегда сопровождается воздействием помех. При проектировании аппаратуры для проведения анализа и разработки способов и устройств обработки принимаемых сигналов бывает удобно все сигналы и помехи приводить к плоскости фоточувствительного слоя приемника и использовать пуассоновскую модель сигналов [2–4]. В рамках этой модели наблюдаемые сигналы и помехи представляются в виде случайного потока носителей заряда (электронов или дырок), порождаемых воздействующим

щим на приемник излучением. Наблюдаемый поток (поток событий) характеризуется координатами генерируемых носителей на плоскости фоточувствительного слоя ξ и моментами времени их генерации τ . При этом сами носители (события) могут порождаться как воздействующим на приемник световым и тепловым излучением, так и некоторым гипотетическим излучением, эквивалентным в некотором смысле внутренним шумам приемника. Среднее число событий в единицу времени на единице площади принято называть интенсивностью наблюдаемого потока событий (или поля событий), будем обозначать его λ . Если интенсивность потока изменяется по плоскости фоточувствительного слоя и во времени, то параметр λ будет функцией пространственных координат $\xi = (\xi', \xi'')$ и времени τ , т. е. $\lambda = \lambda(\tau, \xi)$. Число событий поля N , наблюдаемых на любом временном интервале и любом участке плоскости фоточувствительного слоя, является случайной величиной. Для подавляющего большинства важных для практики случаев при $\lambda = \text{const}$ эта случайная величина описывается пуассоновским законом распределения вероятностей с параметром λ , значение которого выражается через параметры фотоприемника и воздействующего излучения [2, 4].

Интенсивность потока носителей $\lambda(\tau, \xi)$, описывающего информационную сторону преобразования сигналов в МФП в соответствии с пуассоновской моделью, является суммой двух составляющих – $\lambda_0(\tau, \xi)$, порождаемой всеми видами помех, и $\lambda_1(\tau, \xi)$, порождаемой световым излучением полезного сигнала, т. е.

$$\lambda(\tau, \xi) = \lambda_0(\tau, \xi) + \lambda_1(\tau, \xi). \quad (1)$$

Помеховая составляющая $\lambda_0(\tau, \xi)$ может быть, в свою очередь, представлена в виде суммы трех составляющих

$$\lambda_0(\tau, \xi) = \lambda_{01}(\tau, \xi) + \lambda_{02}(\tau, \xi) + \lambda_{03}, \quad (2)$$

где $\lambda_{01}(\tau, \xi)$ – составляющая, порожденная световыми помехами;

$\lambda_{02}(\tau, \xi)$ – составляющая, порожденная действием на фоточувствительный слой фотоприемника теплового излучения;

λ_{03} – составляющая, соответствующая некоторому световому излучению, эквивалентному внутренним шумам приемника, возникающим за пределами фоточувствительного слоя.

Интенсивность сигнального поля определяется как интенсивность реального поля но-

сителей, возникающих под действием поля освещенностей полезного сигнала на фотослое $E_1(\tau, \xi)$,

$$\lambda_1(\tau, \xi) = \varepsilon E_1(\tau, \xi) / e = \varepsilon_e E_1(\tau, \xi), \quad (3)$$

где ε и $\varepsilon_e = \varepsilon / e$ – интегральная чувствительность фотослоя приемника к световому излучению, выраженная соответственно в А/лм и эл/с лм; e – заряд электрона, Кл.

При формировании выходного сигнала в МФП происходит накопление заряда в течение времени экспозиции t и дополнительное усиление, с учетом этого нормируются выходной сигнал и вольтовая интегральная чувствительность приемника в целом S , выражаемая в В/лк. Величина S связана с ε_e соотношением

$$S = \varepsilon_e k_e s t, \quad (4)$$

где k_e – коэффициент преобразования в фотоприемнике заряда одного электрона в выходное напряжение, В/эл, s – площадь одного пикселя, м².

Отметим, что принципиальная разница между параметрами ε и S состоит в том, что ε зависит только от эффективности преобразования фотослоем света в электрический сигнал, а S – еще и от s и t . Параметр ε и его модификация ε_e характеризуют также световые шумы МФП. Исходя из этого, параметры ε и ε_e следует считать более информативными при оценке эффективности МФП, чем параметр S .

С учетом сказанного формулу для $\lambda_1(\tau, \xi)$ можно переписать в виде

$$\lambda_1(\tau, \xi) = \frac{S E_1(\tau, \xi)}{k_e s t}. \quad (5)$$

Аналогично определяется интенсивность $\lambda_{01}(\tau, \xi)$, порождаемая световыми помехами с освещенностью на фотослое $E_{01}(\tau, \xi)$,

$$\lambda_{01}(\tau, \xi) = \frac{S E_{01}(\tau, \xi)}{k_e s t}. \quad (6)$$

Составляющие $\lambda_{02}(\tau, \xi)$ и λ_{03} характеризуют внутренние шумы фотоприемника, их суммарную интенсивность обозначим $\lambda_{0\text{фп}}$. Для дальнейшего анализа зависимость составляющих от пространственных координат и времени не имеет значения, поэтому в их обозначении мы опустим τ, ξ и с учетом этого можем записать

$$\lambda_{0\text{фп}} = \lambda_{02} + \lambda_{03}. \quad (7)$$

Интенсивность поля полезного сигнала $\lambda_1(\tau, \xi)$ представим в виде

$$\lambda_1(\tau, \xi) = \Lambda_1 f(\xi - \mathbf{x}), \quad (8)$$

где Λ_1 – константа, характеризующая интенсивность полезного сигнала, $f(\xi - \mathbf{x})$ – функция, описывающая распределение интенсивности полезного сигнала в плоскости переменного ξ и нормированная условием

$$\int_G f(\xi - \mathbf{x}) d\xi = 1, \quad (9)$$

\mathbf{x} – параметр, определяющий положение источника излучения в пространстве. В (9) интегрирование ведется по той части G плоскости, в которой интенсивность полезного сигнала отлична от нуля.

В [2] показано, что интенсивность внутренних шумов МФП с накоплением $\lambda_{0\text{фп}}$ связана с пороговой экспозицией $H_{\text{п}}$ и другими параметрами МФП соотношением

$$\lambda_{0\text{фп}} = (H_{\text{п}} \varepsilon_e)^2 s/t. \quad (10)$$

Значение $\lambda_{0\text{фп}}$ может быть выражено также через пороговую освещенность $E_{\text{п}} = H_{\text{п}}/t$.

Учитывая выражение (4), связывающее S и ε , соотношение для $\lambda_{0\text{фп}}$ можно записать в виде

$$\lambda_{0\text{фп}} = (H_{\text{п}} S/k_e)^2 (1/st^3). \quad (11)$$

Соотношение (11) определяет значение интенсивности пуассоновского поля помех, эквивалентного по дисперсии шумов на выходе фотоприемника шумам реального МФП.

Для решения типовых задач приема сигналов (задач обнаружения сигналов, оценки параметров) необходимо иметь информацию об интенсивности помех, которыми сопровождается прием. Потенциально достижимые характеристики приема напрямую зависят от интенсивности воздействующих помех. В [4, 5] приведены количественные соотношения, определяющие эти характеристики при приеме слабого оптического сигнала. Так, при обнаружении источника сигнала с помощью МФП вероятности правильного и ложного обнаружения полностью определяются отношением сигнал/шум ψ на выходе согласованного пространственного фильтра, причем квадрат этого отношения определяется выражением

$$\psi^2 = \frac{\Lambda_1^2 t}{\lambda_0 s} \sum_{i=1}^M \left[\int_{g_i} f(\xi) d\xi \right]^2, \quad (12)$$

где λ_0 – интенсивность суммарного поля помех, $i = 1, \dots, M$ – номера пикселей g_i , в кото-

рых ожидается излучение обнаруживаемого источника.

В задаче оценки координат $(x', x'') = \mathbf{x}$ источника излучения, создающего в плоскости фоточувствительного слоя МФП распределение интенсивности $\lambda_1(\tau, \xi)$ вида (8), потенциально достижимая дисперсия оценки координаты x' определяется формулой

$$D\hat{x}' = \frac{\lambda_0}{\Lambda_1^2 t} \left\{ \frac{1}{s} \sum_{i=1}^M \left[\int_{g_i} \frac{\partial f(\xi - \mathbf{x})}{\partial x'} d\xi \right]^2 \right\}^{-1}. \quad (13)$$

Для координаты x'' формула аналогична.

При оценивании интенсивности источника излучения Λ_1 потенциально достижимая дисперсия оценки составит

$$D\Lambda_1 = \frac{\lambda_0}{t} \left\{ \frac{1}{s} \sum_{i=1}^M \left[\int_{g_i} f(\xi) d\xi \right]^2 \right\}^{-1}. \quad (14)$$

Если количество пикселей, занятых полезным сигналом, велико ($M \gg 1$), то суммы, входящие в выражения (12), (13), (14), с учетом множителя $1/s$ путем несложных преобразований могут быть заменены соответствующими интегралами. После такой замены эти выражения примут вид

$$\psi^2 = \frac{\Lambda_1^2 t}{\lambda_0} \int_G f^2(\xi) d\xi, \quad (15)$$

$$D\hat{x}' = \frac{\lambda_0}{\Lambda_1^2 t} \left\{ \int_G \left[\frac{\partial f(\xi - \mathbf{x})}{\partial x'} \right]^2 d\xi \right\}^{-1}, \quad (16)$$

$$D\Lambda_1 = \frac{\lambda_0}{t} \left[\int_G f^2(\xi) d\xi \right]^{-1}. \quad (17)$$

Если распределение освещенности на МФП в изображении источника полезного сигнала таково, что полезный сигнал наблюдается в небольшом количестве пикселей (“точный” источник), то степень приближения выражений (15), (16), (17) к действительным значениям соответствующих им параметров снижается и для повышения точности приближения требуется введение поправочных коэффициентов, зависящих от соотношения размеров изображения и пиксела. Однако характер зависимости ψ^2 , $D\hat{x}'$, $D\Lambda_1$ от λ_0 , t , Λ_1 при этом сохраняется.

Из (15), (16), (17) видно, что при любых размерах пиксела и любом времени накопления результат решения типовых задач обнаружения и оценки параметров тем лучше, чем больше Λ_1 и меньше λ_0 . Увеличение Λ_1 достигается за счет увеличения интегральной чувствительности ε_e (см. (3)), уменьшение λ_0 – за счет снижения интенсивности внутренних помех МФП $\lambda_{0\text{фп}}$ (см. (2), (7)). Фактически интегральная чувствительность ε_e и интенсивность внутренних шумов $\lambda_{0\text{фп}}$ являются объективными количественными показателями возможностей конкретного МФП при работе с малыми уровнями освещенности вне зависимости от размеров пиксела и времени накопления. Отсюда вытекает важность знания этих параметров как при сопоставлении различных МФП, так и при проектировании оптико-электронных приборов с МФП.

В соответствии со сложившейся практикой и стандартом [1] при проведении испытаний в качестве параметра, характеризующего возможности МФП при работе со слабыми сигналами, используется пороговая освещенность $E_{\text{п}}$ или пороговая экспозиция $H_{\text{п}}$. Связь $H_{\text{п}}$ с $\lambda_{0\text{фп}}$ устанавливается соотношением (11). Следует иметь в виду, что последнее соотношение не отражает в явном виде зависимость $H_{\text{п}}$ от площади пиксела s и времени экспозиции t , так как входящий в него параметр S зависит от s и t . Зависимость $H_{\text{п}}$ от s и t в явном виде может быть получена из (10), в котором параметр ε_e не зависит от s и t ,

$$H_{\text{п}} = \frac{1}{\varepsilon_e} \sqrt{\frac{\lambda_{0\text{фп}} t}{s}}. \quad (18)$$

Из (18) видно, что пороговая экспозиция зависит не только от $\lambda_{0\text{фп}}$, но и от площади пиксела s и времени экспозиции t . В этом состоит неудобство использования традиционного понятия “пороговая экспозиция” (так же как и “пороговая освещенность”) для сопоставительного анализа разных типов МФП. В то же время понятие “пороговая экспозиция” учитывает оба показателя эффективности МФП (ε_e и $\lambda_{0\text{фп}}$) и в этом смысле оно в обобщенном виде отражает потенциальные возможности приемника по регистрации слабых оптических сигналов. Для проведения корректного сопоставления указанные пороговые параметры приемников необходимо “приводить” к одному размеру пиксела и одному времени экспозиции. Подробнее такое “приведение” рассматривается в разделе 4.

3. Составляющие внутренних шумов МФП

В соответствии с физическими процессами, порождающими внутренние шумы МФП, принято выделять несколько основных составляющих этих шумов [6]: дробовый шум темнового тока, дробовый шум фототока, шум перезаряда (шум установки, kTC -шум), шум внутреннего усиления, “геометрический” шум. Последняя составляющая, связанная с неоднородностью темнового сигнала и чувствительности массива пикселей, не является шумом в полном смысле, так как для конкретного экземпляра МФП картина неоднородности фиксирована, поэтому могут быть использованы различные способы ее компенсации. Что касается остальных составляющих, то, с системной точки зрения, их удобно сгруппировать в две группы – дробовые шумы потока носителей, возникающие в фотослое (шумы темнового тока и фототока), и тепловые шумы, возникающие за пределами фотослоя (шумы сброса и внутреннего усиления). Принципиальное отличие этих двух составляющих в том, что дробовые шумы зависят от времени накопления, а тепловые – не зависят (см. ниже). Этот факт необходимо учитывать при проектировании аппаратуры (в частности, при выборе времени накопления), для чего необходимо, во-первых, знать количественные характеристики каждой из указанных двух составляющих и, во-вторых, представить их в терминах интенсивности поля носителей. Обозначим дисперсию дробового шума $\sigma_{\text{др}}^2$, дисперсию теплового шума $\sigma_{\text{т}}^2$. Тогда дисперсия шума σ^2 на выходе тракта обработки сигнала МФП может быть представлена в виде суммы

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{др}}^2 + \sigma_{\text{т}}^2. \quad (19)$$

Двум составляющим шума $\sigma_{\text{др}}$ и $\sigma_{\text{т}}$ могут быть поставлены в соответствие две пороговые экспозиции – $H_{\text{пдр}}$, соответствующая дробовому шуму, и $H_{\text{пт}}$, соответствующая теплового шуму. Поделив обе части равенства (19) на S^2 и умножив их на t^2 , а также учитывая, что $\sigma t/S = H_{\text{п}}$, можем записать

$$H_{\text{п}}^2 = H_{\text{пдр}}^2 + H_{\text{пт}}^2. \quad (20)$$

Как будет показано далее, каждая из составляющих пороговой экспозиции по-разному изменяется в зависимости от размера пиксела, времени накопления, частоты считывания информации. Поэтому знание этих составляющих позволяет при проектировании аппара-

туры более удачно выбрать как тип МФП, так и режим его работы – время накопления и частоту считывания.

Заметим, что выше к дробовому шуму мы отнесли шумы темнового тока и фототока. Поскольку далее речь будет идти о пороговых характеристиках МФП в темновых условиях, чтобы не усложнять обозначения в формулах, под $H_{\text{пдр}}$ будем понимать пороговую экспозицию, соответствующую только шуму темнового тока. С учетом этого замечания $H_{\text{пдр}}$ связана с интенсивностью поля носителей λ_{02} соотношением, аналогичным формуле (18), –

$$H_{\text{пдр}} = \frac{1}{\varepsilon_e} \sqrt{\frac{\lambda_{02} t}{s}}. \quad (21)$$

Обратим внимание на то, что $H_{\text{пдр}}$ зависит как от t , так и от s .

Дисперсия теплового шума σ_T^2 определяется выражением

$$\sigma_T^2 = 2N_0 \Delta f, \quad (22)$$

где $2N_0$ – спектральная плотность (односторонняя) теплового шума, Δf – полоса частот пропускания тракта обработки сигнала МФП.

В составе теплового шума МФП можно выделить три составляющие. Две относятся к шуму перезаряда накопительной емкости C и порождаются шумом омического сопротивления R ключа, через который происходит перезаряд этой емкости. Первая (шум установки исходного потенциала или просто шум установки) действует на той части интервала считывания, когда ключ открыт и происходит заряд емкости до исходного состояния. Постоянная времени перезаряда много меньше периода тактовой частоты считывания, поэтому спектральная плотность этой составляющей постоянна в широкой полосе частот и равна $4kTR$ В²/Гц, где $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – температура, K – моменту закрытия ключа на емкости устанавливается некоторый исходный потенциал, включающий случайную добавку за счет шума. Эта случайная добавка является второй составляющей шума перезаряда и действует на той части интервала считывания, когда ключ закрыт и происходит перезаряд емкости фотонами, накопленными в очередном пикселе МФП. Это так называемый kTC -шум, он представляет собой импульсы со случайной амплитудой и длительностью, равной интервалу времени, в течение которого накопитель-

ная емкость перезаряжается фотонами. Дисперсия этого шума равна kT/C В² [7].

При использовании в процедуре обработки сигнала МФП способа двойной коррелированной выборки (ДКВ) указанные две составляющие – шум установки и kTC -шум – практически полностью компенсируют одна другую. Необходимо лишь обеспечить, чтобы моменты выборки сигналов для формирования разностного сигнала были строго сфазированы с работой ключа перезаряда накопительной емкости в МФП. Неудачная фазировка может привести не к компенсации этих составляющих, а к их сложению.

Третья составляющая теплового шума – это шум внутреннего выходного усилителя МФП. Это практически белый шум со спектральной плотностью, постоянной в широком диапазоне частот. С учетом сказанного выше об использовании схемы ДКВ при обработке сигнала МФП из проведенного краткого анализа составляющих теплового шума следует, что в формуле (22) величина $2N_0$ представляет собой фактически только спектральную плотность шума выходного усилителя МФП.

Полоса пропускания тракта обработки сигнала МФП должна соответствовать условию теоремы отсчетов Котельникова

$$\Delta f = 1/2T_{\text{сч}}, \quad (23)$$

где $T_{\text{сч}}$ – период тактовой частоты считывания сигнала в МФП. Поэтому из (22) следует

$$\sigma_T^2 = 2N_0/2T_{\text{сч}}. \quad (24)$$

Отсюда с учетом того, что $\sigma_T^2/S^2 = E_{\text{пт}}^2$, $E_{\text{пт}}^2 t^2 = H_{\text{пт}}^2$ и (4), получим

$$H_{\text{пт}} = \frac{1}{\varepsilon_e k_e s} \sqrt{\frac{2N_0}{2T_{\text{сч}}}}. \quad (25)$$

Формула (25) выражает в явном виде связь $H_{\text{пт}}$ с $T_{\text{сч}}$ – для уменьшения $H_{\text{пт}}$ необходимо увеличивать $T_{\text{сч}}$. Для экспериментального определения $H_{\text{пт}}$ более удобна модификация этой формулы, получаемая заменой в ней подкоренного выражения на σ_T^2 ,

$$H_{\text{пт}} = \frac{\sigma_T}{\varepsilon_e k_e s}. \quad (26)$$

Подчеркнем еще раз, что в (25), (26) предполагается выполнение условия согласования полосы пропускания тракта усиления МФП с тактовой частотой (условия (23)). Обратим внимание также на то, что $H_{\text{пт}}$, как и $H_{\text{пдр}}$, зависит от s , но, в отличие от $H_{\text{пдр}}$, не зависит от t .

Тепловому шуму со спектральной плотностью $2N_0$ (см. формулы (22), (24)) может быть поставлен в соответствие некоторый пространственно-временной пуассоновский поток импульсов в виде δ -функций, генерируемых фоточувствительной поверхностью МФП. Интенсивность этого потока λ_{03} может быть найдена из следующих соображений. Дисперсия наблюдаемого теплового шума, с одной стороны, может быть записана в виде (22), (24), а с другой стороны, эту же дисперсию можно выразить через интенсивность вышеуказанного гипотетического пространственно-временного потока λ_{03} как

$$\sigma_T^2 = \lambda_{03} t s k_e^2. \quad (27)$$

Приравнявая (27) и (24), можем найти

$$\lambda_{03} = 2N_0 / 2T_{сч} t s k_e^2. \quad (28)$$

Эта формула отражает связь λ_{03} с $T_{сч}$, t и параметрами МФП s , k_e и $2N_0$. Для определения λ_{03} из экспериментальных данных необходимо решить (27) относительно λ_{03}

$$\lambda_{03} = \sigma_T^2 / t s k_e^2. \quad (29)$$

Формулы (21), (25) в явном виде отражают тот факт, что дробовая составляющая пороговой экспозиции МФП зависит от времени накопления, а тепловая – не зависит, но обе зависят от площади пиксела. Поэтому при сопоставлении разных типов МФП по пороговой экспозиции ее значения необходимо приводить к единым времени накопления и размерам пиксела.

4. Оценка шумовых параметров некоторых типов МФП

С целью демонстрации представления о численных значениях рассмотренных выше параметров выполнен анализ четырех типов современных МФП – ПЗС-матриц ICX429A фирмы Sony (Япония), TH7888A фирмы Atmel (США), ISD077AP фирмы SILAR (Россия, Санкт-Петербург), матрицы активных пикселей Star 1000 фирмы Fillfactory (Бельгия). Анализ проводился для TH7888A, ISD077AP, Star 1000 по данным, приведенным в материалах фирм-изготовителей, а для ICX429A (поскольку в документации фирмы Sony отсутствуют данные по шумовым параметрам) – по результатам экспериментальных исследований (использованы результаты измерений для худшего из трех образцов). Результаты оценок интенсивностей поля суммарных внутренних шумов, дробовой и тепловой составляющих, соответствующих им пороговых экспозиций, а также значения интегральной чувствительности представлены в табл. 1. Физический смысл представленных интенсивностей – число электронов в единицу времени с единицы площади фоточувствительного слоя, создающих такие значения дисперсии шума на выходе МФП, которые имеются в образцах. При этом учтен тот факт, что вытекающая из формул (10), (11) размерность интенсивностей эл/м² с неудобна для практического использования, так как площадь реальных пикселей в МФП на несколько порядков меньше квадратного ме-

Таблица 1. Сравнительные параметры некоторых типов МФП

Параметры		Тип МФП			
		ISD-077AP	TH7888A	ICX-429AL	Star-1000
1	Формат	1160×1040	1024×1024	795×596	1024×1024
2	Размер пиксела, мкм×мкм	16×16	14×14	8,6×8,3	15×15
3	Частота считывания, МГц	5,0	15,0	14,0	10,0
4	$\lambda_{02}^{уп}$, эл/с у.п.	176	6060	5896	1090
5	$\lambda_{03}^{уп}$, эл/с у.п.	5208	6313	3140	42920
6	$\lambda_{0ФП}^{уп}$, эл/с у.п.	5384	12373	9035	44010
7	$\epsilon_e^{уп}$, эл/лкс	$0,12 \times 10^6$	$0,68 \times 10^6$	$1,65 \times 10^6$	$0,46 \times 10^6$
8	$H_{пдп}^{уп}$, лкс	$4,94 \times 10^{-5}$	$5,1 \times 10^{-5}$	$2,1 \times 10^{-5}$	$3,15 \times 10^{-5}$
9	$H_{пт}^{уп}$, лкс	$4,6 \times 10^{-4}$	$5,2 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-5}$	$2,14 \times 10^{-4}$
10	$H_{п}^{уп}$, лкс	$4,62 \times 10^{-4}$	$7,28 \times 10^{-5}$	$2,6 \times 10^{-5}$	$2,26 \times 10^{-4}$

Таблица 2. Параметры МФП, определяющие их пороговые возможности (по данным фирм-изготовителей)

Параметры		Тип МФП			
		ISD-077AP	ТН7888А	ICX-429AL	Star-1000
1	Параметры световой чувствительности	Квантовая эффективность в максимуме кривой спектральной чувствительности – 60%	Чувствительность в максимуме кривой спектральной чувствительности – 8,2 В/мкДж×см ²	Сигнал при яркости источника 706 кд/м ² и объективе 1:8 – 5,5 В	Чувствительность в максимуме кривой спектральной чувствительности – 0,14 А/Вт
2	Темновой сигнал (средний)	Менее 7 эл/с×пикс (при темп. – 35 °С)	Менее 3 мВ	Менее 2 мВ	Менее 25 мВ/с
3	Шумовые параметры	Шум чтения – менее 40 эл.	Шум чтения – менее 160 мкВ, полный шум – менее 200 мкВ	Не нормируются	Тепловой шум – менее 720 мкВ
4	Тактовая частота, МГц	5	15	14	5

тра. Чтобы исключить это неудобство и сделать соответствующие цифры более наглядными, в качестве единицы площади принят условный пиксел (у. п.) с размерами 10 мкм×10 мкм. Значения интенсивностей $\lambda_{0\text{фп}}$, λ_{02} , λ_{03} , приведенные к этому условному пикселу, обозначены соответственно $\lambda_{0\text{фп}}^{\text{уп}}$, $\lambda_{02}^{\text{уп}}$, $\lambda_{03}^{\text{уп}}$. Связь между первыми и вторыми выражается соотношениями

$$\lambda_{\dots} = 10^{10} \lambda_{\dots}^{\text{уп}}. \quad (30)$$

То же относится к параметру $\varepsilon_e = \varepsilon/e$ – интегральной чувствительности фотослоя, выражаемой в количестве электронов в секунду с единицы площади, отнесенное к освещенности. Если за единицу площади принять тот же условный пиксел, то цифры будут более наглядны. Соответствующее значение этого параметра обозначим $\varepsilon_e^{\text{уп}}$, причем

$$\varepsilon_e = 10^{10} \varepsilon_e^{\text{уп}}. \quad (31)$$

Аналогично выполнено приведение значения пороговых экспозиций $H_{\text{п}}$, $H_{\text{пдр}}$, $H_{\text{пт}}$ к условному пикселу 10 мкм×10 мкм, единому времени накопления $t^{\text{уп}} = 0,2$ с и единому периоду $T'_{\text{сч}} = 0,1$ мкс частоты считывания 10 МГц. Приведенные значения обозначены $H_{\text{п}}^{\text{уп}}$, $H_{\text{пдр}}^{\text{уп}}$, $H_{\text{пт}}^{\text{уп}}$ соответственно. Связь реальных и приведенных значений пороговых экспозиций выражается соотношениями

$$H_{\text{пдр}} = H_{\text{пдр}}^{\text{уп}} \sqrt{\frac{t s^{\text{уп}}}{t^{\text{уп}} s}}, \quad (32)$$

$$H_{\text{пт}} = H_{\text{пт}}^{\text{уп}} \frac{s^{\text{уп}}}{s} \sqrt{\frac{T'_{\text{сч}}}{T_{\text{сч}}}}, \quad (33)$$

$$H_{\text{п}}^{\text{уп}2} = H_{\text{пдр}}^{\text{уп}2} + H_{\text{пт}}^{\text{уп}2}. \quad (34)$$

При приведении к единому периоду считывания изменяются также параметры $\lambda_{03}^{\text{уп}}$ и $\lambda_{0\text{фп}}^{\text{уп}}$, новые значения которых определяются соотношениями

$$\lambda_{03}^{\text{уп}'} = \lambda_{03}^{\text{уп}} \frac{T_{\text{сч}}}{T'_{\text{сч}}}, \quad (35)$$

$$\lambda_{0\text{фп}}^{\text{уп}'} = \lambda_{02}^{\text{уп}} + \lambda_{03}^{\text{уп}'}. \quad (36)$$

Для иллюстрации трудностей, возникающих при сопоставлении различных МФП на основе данных фирм-изготовителей, в табл. 2 приведены параметры МФП, взятые из материалов этих фирм (date sheets и рекламных проспектов). Уже из беглого просмотра табл. 2 видно, что какие-либо выводы о возможностях того или иного МФП можно сделать только после серьезных расчетов с привлечением дополнительных данных.

5. Заключение

Проведенный анализ смыслового содержания и взаимосвязи различных шумовых параметров МФП дает возможность сделать следующие выводы.

1. Традиционно используемые для описания шумовых свойств МФП параметры “пороговая экспозиция” (или “пороговая освещенность”),

“вольтовая интегральная чувствительность” в обычном виде неудобны для сопоставительного анализа различных МФП ввиду зависимости значений этих параметров от времени накопления, размера пиксела, периода считывания выходного сигнала.

2. В отличие от сказанного в п. 1, интегральная чувствительность ε_e , выраженная числом электронов в секунду на люмен, и интенсивность внутренних шумовых электронов $\lambda_{0\text{фп}}$, выраженная в количестве электронов в секунду с единицы площади и приведенная к единому времени накопления и единому периоду считывания, являются объективными количественными показателями возможностей конкретного МФП при работе с малыми уровнями освещенности вне зависимости от размеров пиксела, времени накопления, периода считывания. При этом параметр $\lambda_{0\text{фп}}$ должен аккумулировать все источники внутренних шумов МФП согласно формулам (7), (29).

3. Понятие “пороговая экспозиция” учитывает оба показателя эффективности МФП

(ε_e и $\lambda_{0\text{фп}}$) и в обобщенном виде отражает его потенциальные возможности по приему слабых оптических сигналов. Для проведения корректного сопоставления различных МФП их пороговую экспозицию необходимо “приводить” к одному размеру пиксела, одному времени экспозиции и одному периоду считывания.

4. При проектировании аппаратуры с МФП для корректного выбора времени накопления и периода считывания информации необходимо знать составляющие приведенной интенсивности внутренних шумов МФП (или приведенной пороговой экспозиции) – дробовую и тепловую, поскольку эти составляющие по-разному изменяются при изменении вышеуказанных временных параметров. Методика экспериментального определения составляющих шумов МФП является предметом дальнейших исследований.

Автор выражает благодарность И.С. Розову за тщательно и творчески выполненные экспериментальные исследования МФП ICX429A.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Приборы фоточувствительные с переносом заряда. Методы измерения параметров. ГОСТ 28953-91. М.: Издательство стандартов, 1991. 46 с.
2. Федосеев В.И. О пуассоновской модели сигналов фотоприемников // ОМП. 1982. № 7. С. 18–20.
3. Федосеев В.И. О пуассоновской модели сигналов в оптико-электронных системах // Известия вузов. Приборостроение. 1985. Т. 28. № 6. С. 49–53.
4. Федосеев В.И. Прием пространственно-временных сигналов в оптико-электронных системах. М.: Изд-во “Университетская книга”, 2011. 231 с.
5. Федосеев В.И. Анализ оптических сигналов матричными фотоприемниками // Известия вузов. Приборостроение. 1984. Т. 27. № 7. С. 70–79.
6. Holst G.C. CCD arrays, cameras, and displays // SPIE Optical Engineering Press, Washington, USA, 1998. 378 p.
7. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. М.: Физматкнига, 2005. 384 с.