

УДК 621.383.7

# Современные матричные фотоприёмники для приёма слабых сигналов в приборах астроориентации космических аппаратов

© 2017 г. **В. И. Федосеев, ДОКТОР ТЕХН. НАУК**

Научно-производственное предприятие «Геофизика-Космос», Москва

E-mail: info@geofizika-cosmos.ru

Поступила в редакцию 06.06.2017

Рассматриваются три класса современных матричных фотоприёмников для приёма слабых оптических сигналов — традиционные фотопреобразователи с переносом заряда (ФППЗ), фотопреобразователи с переносом заряда и умножением (ФППЗУ), фотопреобразователи на основе КМОП-технологии (КМОП-матрицы). Отмечаются особенности каждого класса в выполняемых функциях, архитектуре, фотоэлектрических и эксплуатационных характеристиках, из которых вытекает эффективность их использования в той или иной аппаратуре. Приводятся примеры выпускаемых в настоящее время матричных фотоприёмников, демонстрирующие возможности каждого из рассматриваемых классов.

**Ключевые слова:** матричные фотоприёмники, параметры фотоприёмников, внутренние шумы приёмников.

**Коды OCIS:** 070.4560, 070.6110, 200.3050.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Номенклатура современных матричных фотоприёмников, выпускаемых промышленностью и применяемых в оптико-электронных системах (ОЭС), достаточно разнообразна и включает три основных наиболее распространённых класса:

- традиционные фотопреобразователи с переносом заряда (ФППЗ), называемые также приёмниками на основе ПЗС или ПЗС-приёмниками,
- ФППЗ с умножением электронов (ФППЗУ),
- матричные фотопреобразователи на основе КМОП-технологии (КМОП-матрицы).

Приёмники каждого из этих классов отличаются определёнными особенностями, поэтому в случае применения в конкретных областях, в частности в приборах астроориентации космических аппаратов (КА), имеют свои достоинства и недостатки. В настоящей работе рассматриваются особенности этих классов приёмников с акцентом на задачи приёма слабых оптических сигналов в приборах КА, приводятся примеры выпускаемых промышленностью образцов, демонстрирующие возможности их использования в аппаратуре.

К сожалению, в настоящее время отсутствует единая терминология в трактовке многих понятий в рассматриваемой области, поэтому в ходе изло-

жения приходится давать пояснения смысла используемых терминов, в некоторых случаях приводить 2–3 варианта встречающихся в литературе названий.

## 2. СОСТАВ ПАРАМЕТРОВ ФОТОПРИЁМНИКОВ, ВАЖНЫХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРИБОРАХ АСТРООРИЕНТАЦИИ КА

К числу параметров, наиболее важных для применения того или иного фотоприёмника в приборах астроориентации КА, следует отнести следующие:

- шумовые параметры, характеризующие соотношение собственных шумов приёмника и величины принимаемого сигнала [1],
- параметры пространственной разрешающей способности,
- параметры, характеризующие устойчивость к воздействию факторов космического пространства.

Наиболее полно вопросы систематизации параметров проработаны применительно к ФППЗ, имеется соответствующий ГОСТ [2]. Поэтому анализ особенностей в значимости параметров приёмников применительно к астроприборам проведём на примере ФППЗ.

Что касается шумовых параметров, то часто применяемый параметр «пороговая экспозиция» достаточно информативным представляется лишь для задач обработки протяжённых изображений. В задачах приёма сигналов точечных источников размер изображения на фотоприёмнике должен быть согласован с размером пиксела [3]. Поэтому для этого случая более информативным является параметр «пороговая световая энергия на один пиксел», равный произведению пороговой экспозиции на площадь пиксела. Далее мы будем использовать оба этих параметра.

В ФППЗ центральную роль играет фотопреобразующий пиксел (photogate), который выполняет преобразование света в носители заряда, накопление носителей в течение времени экспонирования, перенос накопленного заряда из пиксела в пиксел при считывании накопленных зарядов.

Кроме перечисленных трёх основных функций в пикселе ФППЗ часто реализуются дополнительные функции, которые могут быть важными для ряда приложений (антиблюминг, электронный затвор и др.).

В соответствии с функциями, выполняемыми в ФППЗ, принято выделять следующие основные составляющие их внутренних шумов:

- дробовый шум темного тока,
- дробовый шум фототока,
- шум переноса,
- шум предустановки (шум перезаряда, кТС-шум),
- шум внутреннего усиления,
- «геометрический» шум.

Описание физических процессов, формирующих эти составляющие, можно найти в литературе [4, 5].

Важнейшее условие получения минимального значения шума – использование обработки сигнала по схеме двойной коррелированной выборки (ДКВ) [5]. Можно показать, что дисперсия шума  $D_\tau$  результирующего сигнала после ДКВ, определяется соотношением

$$D_\tau = (D_{t+\tau} + D_t)[1 - k(t, t + \tau)/C],$$

где  $D_t$  и  $D_{t+\tau}$  – дисперсия шума двух выборочных значений в моменты времени  $t$  и  $t + \tau$  соответственно,  $k(t, t + \tau)$  – нормированная корреляционная функция (коэффициент корреляции) сигнала,  $C = (D_{t+\tau} + D_t) / 2\sqrt{D_{t+\tau}D_t} \geq 1$  – параметр, характеризующий степень нестационарности процесса,  $C = 1$  для стационарного процесса.

Как следует из приведённого соотношения, эффективность работы ДКВ существенно зависит от выбора интервала времени  $\tau$  между выборками, который необходимо делать как можно меньше с соблюдением условия сохранения величины полезного сигнала. Это позволяет исключить низко-

частотные составляющие спектра шумов предустановки и внутреннего усиления, снизить общий уровень шума.

Как показывает практика, в современных ФППЗ при работе в пороговых режимах наиболее значимыми из перечисленных составляющих шума являются шумы предустановки и внутреннего усиления (эти составляющие часто называют шумами считывания). Дробовый шум темного тока проявляется при повышенной температуре, дробовый шум фототока – в тех пикселах, где расположено исследуемое изображение, а при наличии помехового фонового излучения – во всех пикселах.

Особенности по сравнению с ФППЗ составляющих шумов приёмников других типов рассмотрены далее в соответствующих разделах.

Исходя из изложенного, представляется целесообразным принять в качестве основных параметров, характеризующих шумовые свойства приёмника, пороговую экспозицию (для задач обработки протяжённых изображений) и пороговую световую энергию на один пиксел (для задач обработки сигналов точечных источников). В качестве обобщённого параметра чувствительности должна быть принята чувствительность по источнику типа А (ист. А), хотя для каких-то приложений потребуется привлекать параметры чувствительности в более узких спектральных диапазонах.

Разрешающая способность матричных приёмников определяется в первую очередь размером пиксела и количеством пикселей в матрице. Необходимо учитывать также возможные искажения сигналов, возникающие в ФППЗ из-за неэффективности переноса, а в КМОП-матрицах – из-за переотражений в полупрозрачных слоях фоточувствительного кристалла.

При использовании фотоприёмников в космической аппаратуре необходимо учитывать одну особенность эффектов воздействия космических излучений, отличающую их от других типов электрорадиоизделий (ЭРИ). В части дозовых эффектов, как и в других ЭРИ, происходит постепенная деградация параметров по мере накопления дозы (это может быть увеличение темного сигнала и шумов, снижение чувствительности и др.). Одиночные же эффекты, порождаемые отдельными заряженными частицами, выражаются, во-первых, в одноразовом восстанавливаемом или невосстанавливаемом нарушении работоспособности, и, во-вторых, в генерации так называемых «дефектов изображения». При этом существенно различное помеховое воздействие на аппаратуру производят кратковременные дефекты, возникающие в одном кадре, и устойчивые дефекты, сохраняющиеся на изображении длительное время. Подробнее об этих эффектах – см. [7, 8].

Таблица 1. Параметры некоторых типов ФППЗ

№ п/п	Наименование приёмника, изготовитель	Количество фото-чувствительных пикселей	Размер пиксела, мкм <sup>2</sup>	Интегральная чувствительность по источнику А, В/лкс	Пороговая экспозиция, лкс	Пороговая световая энергия, лмс	Тактовая частота, МГц	Архитектура
1	ICX-429AL, Sony	752×582	8,6×8,3	20	$3,6 \times 10^{-5}$	$0,26 \times 10^{-14}$	14	Строчный перенос, черезстрочное сканирование
2	TC215, Texas Instruments	1024×1024	12×12	15,7	$2,3 \times 10^{-5}$	$0,33 \times 10^{-14}$	10	Кадровый перенос, 2 выхода
3	CCD47-20, e2V	1024×1024	13×13	13	$0,6 \times 10^{-5}$ (приведённая к 10 МГц), ( $T = -30^\circ\text{C}$ )	$0,1 \times 10^{-14}$ (приведённая к 10 МГц) ( $T = -30^\circ\text{C}$ )	1 (предельная 5)	Кадровый перенос, 2 выхода
4	CCD230-84, e2V	4096×4096 полнокадровый или 4096×2048 кадровый перенос	15×15	10*	$1,0 \times 10^{-5}$ * (приведённая к 10 МГц), ( $T = -25^\circ\text{C}$ )	$0,22 \times 10^{-14}$ * (приведённая к 10 МГц) ( $T = -25^\circ\text{C}$ )	1 (предельная 5)	Полнокадровый или кадровый перенос, 4 выхода
5	«Лидер-1», ЦНИИ «Электрон»	512×512	23×23	6	$2,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-14}$	0,33	Полнокадровый
6	ELСM1077, НПП «Элар», С.-Петербург	1024×1024 полнокадровый или 1024×512 кадровый перенос	16×16	15*	$2,7 \times 10^{-5}$ * (приведённая к 10 МГц), ( $T = -15^\circ\text{C}$ )	$0,6 \times 10^{-14}$ * (приведённая к 10 МГц) ( $T = -15^\circ\text{C}$ )	1	Полнокадровый или кадровый перенос
7	«Квадро – Т», ЦНИИ «Электрон»	1536×1536 полнокадровый или 1536×768 кадровый перенос	11×11	6,6	$2,6 \times 10^{-5}$	$0,32 \times 10^{-14}$	10 (предельная 40)	Полнокадровый или кадровый перенос, 2 выхода
8	«Квадро», ЦНИИ «Электрон»	4096×4096 полнокадровый или 4096×2048 кадровый перенос	11×11	6,6	$2,9 \times 10^{-5}$	$0,35 \times 10^{-14}$	10 (предельная 40)	Полнокадровый или кадровый перенос, 4 выхода

\* Примечание: для ФППЗ CCD230-84 (e2V) и ELСM1077 (НПП «Элар») ввиду неполноты информации в материалах изготовителей по абсолютной чувствительности параметры рассчитаны с использованием экстраполяции данных по приборам-аналогам этих фирм.

### 3. ТРАДИЦИОННЫЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ПЕРЕНОСОМ ЗАРЯДА

ФППЗ имеют более чем сорокалетнюю историю развития, поэтому к настоящему времени достигли большой степени совершенства и широко применяются в ОЭС. Различным вопросам их применения посвящена обширная литература (например [4, 5]). Выпускаемые в настоящее время промышленностью ФППЗ отличаются форматом, архитектурой, фотоэлектрическими и эксплуатационными характеристиками. Их развитие происходило в направлениях увеличения количества пикселей, улучшения фотоэлектрических характеристик, создания новых типов архитектуры. Наиболее распространённые ФППЗ малого и среднего формата — от  $250 \times 250$  до  $1000 \times 1000$  пикселей. Ряд фирм выпускает ФППЗ крупного формата — до 16–20-ти мегапикселей (Kodak, e2V, Dalsa, ЦНИИ «Электрон» и др.). Некоторые фирмы производят ФППЗ сверхкрупного формата — 50 мегапикселей и более. Это e2V (CCD290-99, 85 мегапикселей), Dalsa (FTF9168M, 60 мегапикселей), Kodak (KAF50100, 51 мегапиксел). Сообщается о выполненной фирмой Dalsa разработке ФППЗ с 111 мегапикселями. Что касается типов архитектуры, то сегодня предлагаются ФППЗ полнокадровые и с переносом кадра, с межстрочным переносом, с прогрессивным сканированием и черезстрочным. Имеются разработки ФППЗ с встроенной системой временной задержки и накопления (ВЗН). Подробное описание этих типов архитектуры содержится, например в [5]. Информацию о параметрах указанных выше ФППЗ, также как и других, можно получить на сайтах соответствующих фирм-изготовителей.

Для сокращения общего времени считывания информации с ФППЗ большого формата весь массив пикселей делят на секции, каждая из которых имеет свой выход электрического сигнала. Считывание со всех секций осуществляется параллельно и одновременно. Это даёт возможность сократить время считывания во столько раз, сколько секций в массиве пикселей.

Фотоэлектрические параметры различных ФППЗ сильно отличаются в зависимости от формата, размеров пикселя, режимов измерения и др. Такие характеристики приёмников, как чувствительность к излучению, шумовые свойства и некоторые другие, описываются различными фирмами-изготовителями с помощью разных параметров. Это затрудняет сопоставление приборов разных изготовителей и вынуждает выполнять перерасчёт к некоторой единой системе параметров.

С целью демонстрации достигнутого в настоящее время уровня значений основных фотоэлектрических параметров ФППЗ в табл. 1 представлены данные по некоторым приёмникам среднего и крупного формата. Выбирались образцы с луч-

шими значениями параметров применительно к задачам приёма слабых оптических сигналов. Исходная информация получена с сайтов соответствующих фирм-изготовителей, параметры чувствительности и шумовые вычислены на основе этой исходной информации. По приёмнику ICX429 шумовые параметры определены по результатам экспериментальных измерений (см. [1]).

Данные, приведённые в табл. 1, свидетельствуют о том, что в настоящее время у лучших образцов ФППЗ пороговая экспозиция находится в пределах  $(0,6-3,6) \times 10^{-5}$  лкс, пороговая световая энергия на пиксел — в пределах  $(0,1-1,0) \times 10^{-14}$  лмс. Минимальное значение этих параметров — у ФППЗ CCD47-20 фирмы e2V.

ФППЗ широко применяются в самых различных областях, начиная от бытовых и промышленных устройств до космических.

### 4. ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ПЕРЕНОСОМ ЗАРЯДА И ЭЛЕКТРОННЫМ УМНОЖЕНИЕМ

В последнее десятилетие целым рядом фирм специально для приёма слабых оптических сигналов разработано и освоено производство нового семейства ФППЗ — ФППЗ с электронным умножением (ФППЗУ, см., например [9, 10]). В приёмниках этого типа по сравнению с традиционными ФППЗ введён новый функциональный узел — регистр умножения. Он представляет собой регистр с переносом заряда, в каждом пикселе которого происходит усиление сигнала за счёт лавинного эффекта. Регистр умножения включается между выходом регистра считывания и узлом плавающей диффузии (узловым конденсатором). Общий коэффициент умножения всех ячеек этого регистра достигает несколько сотен. Благодаря этому, шум чтения в приёмнике, вносящий наибольший вклад в баланс шумов, будет определяться не шумом выходного каскада и шумом перезаряда, а шумом регистра умножения. Поскольку шум, вносимый при электронном умножении, значительно меньше, чем шумы перезаряда и выходного усилителя в ФППЗ, то такое решение даёт существенное снижение общего шума. Коэффициент усиления может регулироваться путём регулировки напряжения на ячейках регистра умножения.

ФППЗУ выпускаются меньшим количеством изготовителей, чем традиционные ФППЗ, пока нет приёмников этого типа крупного формата. В табл. 2 в качестве примера представлены основные параметры двух типов ФППЗУ, предлагаемых сегодня известными фирмами-изготовителями.

При сопоставлении данных, приведённых в табл. 2 и в табл. 1, обращают на себя внимание два факта:

– существенно большее (на 1–2 порядка) значение интегральной чувствительности у ФППЗУ,

Таблица 2. Параметры ФППЗ с электронным умножением

№ п/п	Наименование приёмника, изготовитель	Количество фоточувствительных пикселей	Размер пиксела, мкм <sup>2</sup>	Интегральная чувствительность по источнику А, В/лкс	Пороговая экспозиция, лкс	Пороговая световая энергия, лмс	Тактовая частота, МГц	Архитектура
1	TC285SPD-30, Texas Instruments	1004×1002	8×8	5600 (при типовом усилении 200)	$0,5 \times 10^{-6}$	$0,32 \times 10^{-16}$	35	Кадровый перенос
2	CCD201-20, e2V	1024× 1024	13×13	6100 (при типовом усилении 200)	$0,17 \times 10^{-6}$	$0,29 \times 10^{-16}$	15	Кадровый перенос, 2 выхода.

– существенно меньшее (на 1–1,5 порядка) значение у ФППЗУ пороговой экспозиции и пороговой световой энергии.

И то, и другое связано с наличием умножителя электронов в ФППЗУ и открывает качественно новые возможности в проектировании оптико-электронной аппаратуры для приёма слабых оптических сигналов.

Отмеченные особенности ФППЗУ означают, что при использовании этого типа фотоприёмников можно работать со значительно более слабыми сигналами, чем в случае использования традиционных ФППЗ, применять оптику меньших габаритов и более простую. В то же время использование ФППЗУ ведёт к определённым издержкам при проектировании аппаратуры, вызванным сильной зависимостью коэффициента усиления умножителя от температуры и напряжения на нём. Чтобы обеспечить стабильную величину чувствительности ФППЗУ, необходимо стабилизировать напряжение на умножителе в пределах долей процента, температуру — в пределах единиц градусов.

## 5. МАТРИЧНЫЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ КМОП-ТЕХНОЛОГИИ

Недостатком традиционных ФППЗ и ФППЗУ является практическая несовместимость технологии их изготовления с технологией КМОП, которая используется при изготовлении микросхем высокой степени интеграции. По этой причине совершенствование ФППЗ в направлении наращивания количества выполняемых функций затруднено. В последние 2–3 десятилетия на базе развития КМОП-технологии и значительного снижения применяемых в ней размерных технологических норм появилась возможность в габаритах одного пиксела реализовать функционально полную электронную схему. Это предопределило создание матричных фотопреобразователей, изготавливаемых на основе технологии КМОП.

КМОП-матрица содержит дискретную решётку фотопреобразующих пикселей и довольно сложную электронную схему управления ею.

Фотопреобразующий пиксел выполняет те же три функции, что и в ФППЗ, но функция считывания реализуется по-другому: в разрыв цепи выходного сигнала включается ключ, который управляется из схемы управления. Адресация в направлении X (номер пиксела в строке) происходит в схеме управления аналогичным образом с помощью ещё одного ключа и дополнительного усилителя. Эти элементы, обеспечивающие адресацию, вносят дополнительные шумы в цепи сигнала.

За счёт различных схемных и технологических усовершенствований влияние этих факторов на общий уровень шума удалось существенно уменьшить в разработках последних лет [11, 12].

Следует отметить особенность КМОП-матриц, связанную с функционированием электронного затвора. Для этого типа приёмников существует два типа затворов — «бегущая шторка» («rolling shutter») и «одномоментный затвор» («global shutter»). «Бегущая шторка» реализуется наиболее просто, её действие характеризуется тем, что начало интервала экспозиции сдвигается от строки к строке на длительность одной строки при сохранении длительности самого интервала. При работе «одномоментного затвора» интервалы экспозиции всех строк совпадают. В случае обработки неподвижных изображений такое различие двух типов затворов не имеет значения. Если же изображение движется, то анализ таких изображений в случае «бегущей шторки» усложняется.

В табл. 3 представлены параметры 3-х типов КМОП-матриц, по которым имеются достаточно полные данные на сайтах фирм-изготовителей. Приёмники Star 1000 и HAS2 представляют пример КМОП-матриц первого поколения, содержащих пиксели, выполненные по простейшей схеме. По пороговым характеристикам эти приёмники уступают традиционным ФППЗ с сопоставимыми размерами пикселей. CMV 4000 является приме-

Таблица 3. Параметры КМОП-матриц

№ п/п	Наименование приёмника, изготовитель	Количество фоточувствительных пикселей	Размер пиксела, мкм <sup>2</sup>	Интегральная чувствительность по источнику А, В/лк	Пороговая экспозиция, лкс	Пороговая световая энергия, лмс	Тактовая частота, МГц	Тип затвора
1	Star 1000, Cypress Semiconductor Corporation	1024×1024	15×15	11,4	$9,4 \times 10^{-5}$	$2,1 \times 10^{-14}$	10	Rolling
2	HAS2, Cypress Semiconductor Corporation	1024×1024	18×18	37	$4,5 \times 10^{-5}$	$1,45 \times 10^{-14}$	10	Rolling
3	CMV 4000, CMOSIS	2048×2048	5,5×5,5	13,3	$7,3 \times 10^{-5}$	$0,22 \times 10^{-14}$	48	Global

ром разработки следующего поколения, его пороговая световая энергия на пиксел соответствует значениям для ФППЗ. Относительно большая пороговая экспозиция (также, как низкая интегральная чувствительность) связана с малым размером пиксела и при соответствующем пересчёте, учитывающем различие этих размеров, также близка к пороговой экспозиции лучших ФППЗ.

Кроме приведённых в табл. 3 изготовителей, КМОП-матрицы выпускаются и другими зарубежными фирмами — e2V, Sony, Teledyne Imaging Sensors и др. Что касается КМОП-матриц больших и сверхбольших форматов, то разработаны приёмники с количеством пикселей до 70М (CMOSIS). Несколько типов отечественных КМОП-матриц находится в стадии разработки.

Основное преимущество КМОП-матриц по сравнению с ФППЗ состоит в значительном увеличении количества выполняемых функций — включении в состав микросхемы фотоприёмника кроме собственно преобразования света в электрический сигнал ещё и функций обработки этого сигнала (двойной коррелированной выборки, привязки уровня чёрного, программируемого коэффициента усиления, аналого-цифрового преобразования (АЦП) и др.), управления сканированием, режимами работы и т.п. Это стало возможным благодаря достигнутой высокой степени интеграции — в состав КМОП-матриц входит до нескольких миллионов активных элементов.

Платой за столь высокую степень интеграции является известный недостаток таких микросхем — подверженность воздействию заряженных частиц (протонов, тяжёлых заряженных частиц). Для обеспечения устойчивости интегральных микросхем (ИМС) по одиночным эффектам разработаны специальные конструктивные и технологические меры, которые должны реализовываться при проектировании и изготовлении этих ИМС и

которые влияют на многие их конечные характеристики (вплоть до геометрических размеров).

Представленные в табл. 3 приёмники Star 1000 и HAS2 относятся к категории элементов космического применения. В их спецификациях предусмотрены соответствующие нормы по воздействиям ионизирующих излучений. КМОП-матрица CMV 4000 предназначена для работы в аппаратуре широкого применения. Имеются модификации: монохромная, цветная и с повышенной чувствительностью в ближней ИК области, но жёсткие внешние воздействия (в том числе и ионизирующие излучения) в спецификации не оговариваются.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены особенности выпускаемых в настоящее время матричных фотоприёмников трёх наиболее распространённых классов — традиционных фотопреобразователей с переносом заряда (ФППЗ), фотопреобразователей с переносом заряда и умножением (ФППЗУ), фотопреобразователей на основе КМОП-технологии (КМОП-матрицы).

ФППЗ отличаются большим разнообразием по форматам (количество пикселей — до формата более 100 мегапикселей), архитектуре, лучшие образцы из рассмотренных обладают показателями по пороговой экспозиции на уровне  $(0,6-3,6) \times 10^{-5}$  лкс, по пороговой световой энергии на пиксел — на уровне  $(0,1-1,0) \times 10^{-14}$  лмс.

ФППЗУ представляют собой значительный шаг вперёд в направлении улучшения пороговых характеристик — на 1–2 порядка по сравнению с ФППЗ. Их особенностью является более жёсткие требования по стабилизации температуры и питающего напряжения на умножителе.

КМОП-матрицы отличаются большим набором выполняемых функций, высокой степенью интеграции, удобством встраивания в логику взаимодействия с аппаратурой. Пороговые характеристики

ки образцов последнего поколения практически не отличаются от соответствующих характеристик ФППЗ. Для использования в аппаратуре, подвергающейся воздействию ионизирующих излучений, необходима разработка КМОП-матриц, устойчивых к такого рода воздействиям, включая устойчивость по критерию одиночных эффектов.

Из этих данных по состоянию на сегодняшний день вытекают рекомендации по применению приёмников каждого класса: ФППЗ — в высокочувствительных системах с высокими требованиями по пространственному разрешению, ФППЗУ — в сверх-

высокочувствительных системах, где требование высокой чувствительности имеет высший приоритет, КМОП-приёмники — в системах среднего уровня чувствительности и пространственного разрешения, в которых имеются жёсткие ограничения по габаритам и массе.

Автор выражает благодарность канд. техн. наук А.Б. Романовскому, разработавшему методологию расчётов интегральной чувствительности приёмников для различных вариантов исходных данных, содержащихся в материалах изготовителей, и выполнившего эти расчёты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев В.И. Шумовые параметры матричных фотоприёмников // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 6. С. 59–66.
2. Приборы с переносом заряда фоточувствительные. Термины и определения. ГОСТ 25532-89.
3. Федосеев В.И. Приём пространственно-временных сигналов в оптико-электронных системах. М.: Университетская книга, 2011. 231 с.
4. Секен К., Томпсет М. Приборы с переносом заряда. М.: Мир, 1978. 328 с.
5. Holst G.C. CCD arrays, cameras and displays. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1998. 378 p.
6. Филачёв А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А. Твердотельная фотоэлектроника. М.: Физматкнига, 2005. 384 с.
7. Аванесов Г.А., Акимов В.В., Воронков С.В. Результаты испытаний ПЗС-матриц российского и зарубежного производства на источниках заряженных частиц // Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». Сборник трудов. 22–25 сентября 2008 г. Россия. Таруса. С. 447–457.
8. Федосеев В.И., Куняев В.В., Юдина Л.М., Коптев А.А., Тюрин В.С., Иванов Н.И. Результаты испытаний звёздного прибора ориентации КА на воздействие протонного излучения // 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». Сборник трудов. 10–13 сентября 2012 г. Россия. Таруса. С. 190–198.
9. TC285SPD-30. 1004×1002 PIXEL IMPACTRON™ CCD IMAGE SENSOR // Datasheet. На сайте фирмы Texas Instrument // [www.pco.de/fileadmin/user\\_upload/db/download/TC285SPD-30DS.hdf](http://www.pco.de/fileadmin/user_upload/db/download/TC285SPD-30DS.hdf).
10. CCD201-20. Back Illuminated 2-Phase IMO Series. Electron Multiplying CCD Sensor // Datasheet. На сайте фирмы e2V://[www.e2v.com](http://www.e2v.com)
11. Lauxterman S., Lee A., Stevens J., Joshi A. Comparison of global shutter pixels CMOS image sensors // International Image Sensors Workshop. 2007. June 7–10. Ogunquit. Maine USA. 2007. P. 82–85.
12. Bai Y., Bajaj J., Beletic W., Farris M.C., Joshi A., Lauxterman S., Petersen A., Williams G. Teledyne imaging sensors: silicon CMOS imaging technologies for x-ray, UV, visible and near infrared // Proceedings of the SPIE conference on astronomical instrumentation. Marsielle. France. 2008. V. 7021. P. 1–16.