

УДК 681.3-192.0

**В. А. Мелентьев, Е. И. Черепов, И. Б. Чистохин**  
(Новосибирск)

**ЖИВУЧЕСТЬ И ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ  
ФОТОПРИЕМНЫХ СИСТЕМ\***

Дана количественная оценка способности системы обработки изображений противостоять отказам элементов, введены показатели отказоустойчивости и живучести, определены методы их расчета. Для оценки отказоустойчивости и живучести системы обработки изображений и ее компонентов впервые использован критерий Джонсона. Получены выражения для оценки числа фоточувствительных элементов, потенциально необходимого для распознавания стационарных объектов при заданном уровне сложности задачи распознавания. Определены выражения для анализа потенциальной отказоустойчивости и живучести матричных фотоприемных устройств и для синтеза таких устройств с требуемыми значениями этих показателей. Приведены соотношения, указывающие на возможность использования изначально дефектных матриц для применений, менее критичных к отказоустойчивости. Даны граничные условия применения таких матриц. Обоснована необходимость перехода от локальных принципов реализации фотоприемников к распределенным, что позволит перенести свойство живучести на уровень элементов и повысит отказоустойчивость фотоприемных устройств. Показано, что основные показатели качества приборов с такой архитектурой могут быть адаптированы к параметрам исследуемого объекта и фона, динамике изменения сцен и т. п.

**Введение.** Одним из важнейших свойств любой сложной системы, в особенности необслуживаемой или с ограниченным обслуживанием, является живучесть, определяемая [1] как способность сохранять существенные для пользователей рабочие качества в пределах допустимых диапазонов значений их показателей в условиях, возможных в период эксплуатации отказов элементов системы. Для характеристики свойств систем могут быть использованы качественные и экспертные оценки, основанные на опыте разработчиков и применяемые, как правило, при отсутствии достаточной теоретической базы: адекватной модели системы и методов ее формального описания. В силу субъективности такие оценки не имеют широких перспектив в сравнительном анализе архитектурных вариантов и в обосновании их выбора. Традиционно используемые оценки отказоустойчивости и живучести системы методами теории надежности [2] не являются явными по своей сути, так как в этом случае оценивается не определенная выше способность, а вероят-

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 99-01-00605).

ность безотказной работы системы в заданном временном интервале при полной неопределенности корреляционных функций, связывающих характеристики надежности с показателями отказоустойчивости. Кроме того, недостатками «надежного» подхода к определению критериев отказоустойчивого функционирования системы являются [3]:

- чрезвычайно низкая дифференцированность значений надежных показателей в сравнительных оценках различных вариантов, снижающаяся с увеличением структурной сложности системы и числа составляющих ее элементов;

- недостаточная достоверность среднестатистических надежных характеристик, не учитывающих возможные отклонения эксплуатационных режимов и параметров внешней среды, в том числе обусловленные человеческим фактором или направленным извне разрушающим воздействием; кроме того, эти характеристики в силу своей вероятностной природы не исключают возможность отказа системы в целом;

- использование надежных характеристик элементов системы в анализе ее структурной организации приводит к частным результатам, не позволяющим объективно сравнивать между собой именно структуры как определенным образом организованные совокупности взаимосвязанных элементов, а не совокупности элементов, обладающих конкретными значениями показателей надежности. Другие компоненты архитектуры (методы и принципы организации, стратегии и механизмы функционирования, общесистемные и прикладные алгоритмы и т. п.) при надежном подходе в принципе не могут быть учтены, хотя и имеют определяющее значение в формировании свойства отказоустойчивости.

Надежный подход ориентирован, таким образом, на создание систем, высоко- (но не абсолютно) надежных на заданном временном интервале, прежде всего за счет использования элементов повышенной надежности, резервированных и мажоритарных систем. Коэффициент аппаратурной избыточности при этом равен допустимой в системе кратности отказов.

Развиваемый авторами подход [1, 3] направлен на создание систем, сохраняющих работоспособность в расчетном диапазоне кратностей отказов, и основан на оптимизированном распределении различных форм избыточности: от структурной до алгоритмической. Анализ архитектуры живучих систем и их компонентов проводится в обобщенной постановке и базируется на оригинальных моделях, показателях и методах, аксиоматически предполагающих неизбежность отказов, а не их вероятность. Такой подход позволяет обеспечить устойчивость системы не только к «естественным» отказам, коррелирующим с показателями надежности, но и к отказам заданной кратности, обусловленным как внутренними факторами, так и возможными внешними воздействиями. При этом необходимая аппаратурная избыточность значительно ниже допустимой кратности отказов и для больших систем не превышает нескольких процентов.

Целью настоящей работы являются описание некоторых специфических особенностей использования такого подхода, определение возможных перспективных решений в моделировании отказоустойчивых архитектур систем регистрации и обработки изображений, обобщенный (вне зависимости от спектрального диапазона) предварительный анализ и обоснование предлагаемой архитектуры в приложении к несцианируемым фотоприемным системам, прежде всего ИК-диапазона, что обусловлено существующими в насто-

ящее время объективными ограничениями в минимизации размерной базы элементарных фотоприемников.

1. **Показатель живучести.** Формально любую систему можно представить множеством реализуемых ею существенных (жизненно важных) функций

$$F = \{F_1, F_2, \dots, F_{m-1}, F_m\},$$

таких, что

$$Y_i = F_i(X_i) = F_i(Y_{i-1}) = F_i(F_{i-1}(X_{i-1})),$$

$$Y = F(X) = Y_m = F_m(F_{m-1}(F_{m-2}(\dots(F_2(F_1(X_1)))))).$$

Здесь  $X_1 = X$  – исходные данные (внешние воздействия на систему),  $Y$  – выходные данные (результаты обработки, управляющие воздействия). Система считается живучей, если на любом интервале  $\Delta t(t) \geq T_{\max}$  из заданного времени ее эксплуатации  $T_{\text{эспл}} (t \leq T_{\text{эспл}})$  множество реализуемых функций  $F_i$  (тех, которые система способна выполнить) включает в себя множество существенных функций  $F$ ,  $F \subseteq F_i$ . При этом время реализации каждой из функций таково, что суммарное время  $T$  реализации набора существенных функций не превышает заданного максимального значения  $T_{\max}$ :

$$T = \sum_{i=1}^m T_i \leq T_{\max} \quad \text{или} \quad T_i \leq T_{\max} - \sum_{j=1}^{m, j \neq i} T_j. \quad (1)$$

Невозможность реализации любой функции из множества  $F$  либо выполнение ее вне временных интервалов, определенных условием (1), означают отказ системы в целом.

Живучесть фотоприемной системы (ФС) определена как свойство [1, 4], присущее ей в силу функциональной, структурной, алгоритмической и т. п. организации и заключающееся в том, что любой отказ (группа отказов) из числа возможных не выводит систему за пределы реального времени реализации необходимого минимума функций. Результаты каждого этапа обработки в случае отказов отдельных компонентов ФС должны сохранять достоверность, актуальность и достаточность для всех последующих этапов, включая этапы принятия решения и выдачи управляющего воздействия [5]. Под фотоприемной системой здесь понимается функционально полный аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий локализацию и регистрацию фотонного потока, фильтрацию, усиление и считывание фотосигналов, аналого-цифровое преобразование и цифровую обработку изображений. В данном контексте ФС включает в себя оптическую систему, многоэлементное фотоприемное устройство (МФПУ) со схемами электронного сканирования (выборки), усиления, предобработки и преобразования сигнала, а также интерфейс и систему обработки изображения. Физически ФС представляет собой совокупность функционально и конструктивно самостоятельных компонентов, включая интерфейсные составляющие. Таким образом, исследование отказоустойчивости ФС может быть основано на исследовании графа, вершины которого сопоставлены вышеперечисленным модулям, а дуги – интерфейсам (связям) между ними. Отказы в такой системе моделируются изъятием соответствующих компонентов графа.

Для системы, включающей  $N$  ненадежных компонентов, в [1] введены следующие обозначения:  $S_l = \{S_{il}\}$  – множество возможных состояний при кратности  $l \leq N$  отказов,  $I_l = \{I_{il}\}$  – множество соответствующих значений показателя качества функционирования,  $i \in \{1, 2, \dots, |S_l|\}$ .

За меру устойчивости системы к  $l$  отказам принят коэффициент  $K_l(I) = \frac{\bar{I}_l}{\bar{I}_{\min}} \frac{l_{\max} - l}{l_{\max}}$ . Здесь  $\bar{I}_l = \sum_{i=1}^{|S_l|} p_{il} I_{il}$  – среднее значение показателя качества,

$p_{il}$  – вероятность нахождения системы в состоянии  $S_{il}$ , причем  $\sum_{i=1}^{|S_l|} p_{il} = 1$ ;

$l_{\max}$  – такое максимальное число отказов, что на всем множестве состояний  $S_{l_{\max}} = \{S_{il_{\max}}\}$  не найдется ни одного, в котором  $I_{il_{\max}} < I^*$ ;  $I^*$  – значение нижней, определяемой потребностями пользователей границы показателя качества функционирования рассматриваемой системы;  $\bar{I}_{\min} = \bar{I}_{l_{\max}} = \sum_{i=1}^{|S_{l_{\max}}|} p_{il_{\max}} I_{il_{\max}}$  – среднее значение показателя качества при кратности отказа  $l_{\max}$ .

Живучесть системы по показателю  $I$  при  $l$  отказах оценивают отношением  $l$ -го коэффициента устойчивости  $K_l(I)$  к нулевому  $K_0(I)$ , характеризующему функционирование исправной системы:

$$R_l(I) = \frac{K_l(I)}{K_0(I)} = \frac{\bar{I}_l}{I_0} \frac{l_{\max} - l}{l_{\max}}. \quad (2)$$

Отказоустойчивость системы как взаимоорганизованной (функционально, алгоритмически, конструктивно) совокупности составляющих ее конструктивно самостоятельных компонентов может быть охарактеризована минимальным значением из множества  $\{l_{\max}(F_i)\}$ ; здесь  $F_i$  – элемент множества  $F = \{F_i\}$  функций, определяющих функциональную целостность системы. Таким образом, если число таких компонентов  $N$ , а  $I(F)$  – набор показателей качества выполнения этих функций, то отказоустойчивость  $L_{\max}$  системы определяется минимальным из максимальных значений кратности для всех возможных сочетаний отказов во множестве рассматриваемых компонентов, при которой система не теряет функциональной целостности и сохраняет требуемые потребительские качества в заданном диапазоне:

$$L_{\max} = \min_{i=1}^N \{l_{\max}(F_i)\}. \quad (3)$$

**2. Отказоустойчивость и живучесть ФС.** Анализ основных показателей качества компонентов ФС (апертуры и спектральной характеристики оптической системы, числа фоточувствительных элементов (ФЧЭ), спектральной чувствительности, отношения «сигнал/шум» и динамического диапазона, неоднородности по чувствительности и темновому току, геометрических размеров и шага, времени экспозиции, диапазона аналоговых сигналов и времени и точности их преобразования и т. п.) показал, что все эти показатели в определенной мере влияют на объем информации, необходимый и достаточный для решения задачи распознавания объектов из заданного множества. Сложность задачи распознавания принято характеризовать показате-

лем  $\gamma$  [6, 7], который задает возможность наблюдения определенного числа пар линий (щелей) в эквивалентной мире (тест-объекте). Считается, что решение задачи обнаружения объекта требует, чтобы на минимальном размере объекта различалось не менее 2–3 линий эквивалентной мира. Для решения задач видовой идентификации объекта (машина, самолет, ракета и т. д.) и внутривидовой идентификации (тип машины, самолета и т. д.) показатель  $\gamma$  должен составлять соответственно 6–8 и 10–12 линий. Решение задачи визуализации, т. е. преобразования фотосигналов к виду, удобному для зрительского восприятия, может потребовать и большего разрешения. В качестве эквивалента объема информации об объекте для оценки отказоустойчивости и живучести фотоприемной системы в целом и отдельных ее компонентов в работе [3] впервые использован критерий Джонсона, определяющий возможность воссоздания определенного числа пар линий на минимальном габаритном размере проекции объекта в фокальной плоскости.

Итак, основным качеством, определяющим работоспособность ФС, является разрешение, обеспечиваемое фотосистемой в фокальной плоскости на минимальной проекции объекта, подлежащего идентификации. Формат сцены при этом определяется заданным диапазоном удаленностей объекта, а динамические характеристики сцены – максимальной линейной скоростью перемещения проекции объекта в фокальной плоскости фотоприемной матрицы и обеспечиваемым ею разрешением.

Пусть набор распознаваемых объектов находится в некотором диапазоне габаритных размеров  $G_{\min}$  и  $G_{\max}$  (с учетом допускаемых ракурсов), диапазон удаленностей этих объектов от ФС –  $D_{\min}$  и  $D_{\max}$ , уровень сложности задачи распознавания задан показателем  $\gamma$ . Считаем фотоприемную матрицу квадратной с линейным размером  $A$ . Период матрицы (шаг)  $h$  может быть выражен соотношением  $h = A/n$ . Проведем предварительную оценку потенциально необходимого для стационарных объектов минимального числа  $n$  элементов на матрице, исходя из условия, что на минимально допускаемом удалении объекта максимальный габаритный размер его проекции (с учетом ракурса) не должен превышать линейный размер  $A$  матрицы. Размеры проецируемого на матрицу изображения объекта зависят от параметров оптической системы, габаритов объекта и его удаленности от фотосистемы. Тогда  $A = G_{\max} f / D_{\min}$  и минимальный размер спроецированного на матрицу изображения объекта равен  $G'_{\min} = G_{\min} f / D_{\max}$  (здесь  $f$  – фокусное расстояние оптической системы). Для успешного выполнения функции распознавания такого объекта, удаленного от фотосистемы на предельное расстояние при заданном уровне сложности задачи распознавания ( $\gamma^*$ ), необходимо, чтобы на минимальной проекции  $G'_{\min}$  укладывалось не менее  $2\gamma^*$  линий, т. е. число ФЧЭ в минимальном линейном размере этой проекции должно быть не менее  $2\gamma^*$ ,  $m \geq 2\gamma^*$ ,  $m^* = 2\gamma^*$ . (Здесь и далее символом \* отмечены граничные значения параметров, достаточных для сохранения работоспособности системы в минимально допускаемом варианте.) Тогда ФЧЭ должны размещаться на матрице с шагом  $h \leq G_{\min} f / 2\gamma^* D_{\max}$ . Если учесть, что максимальный шаг (по диагонали)  $h_{\max} = \sqrt{2}h$  и  $n^* = A/h_{\max}$ , то получим

$$n^* = \frac{G_{\max}}{G_{\min}} \frac{D_{\max}}{D_{\min}} 2\sqrt{2}\gamma^*. \quad (4)$$

Итак, требуемое значение числа  $n^*$  элементов в строке (столбце) фотоприемной матрицы определяется заданным уровнем сложности задачи распознавания объекта, его габаритными размерами, диапазоном удаленностей объекта от фотоприемной системы и ракурсами. Нетрудно увидеть, что для стационарных объектов с заданными характеристиками число  $m$  фоточувствительных элементов, уместающихся на  $G'_{\min}$ , определяет потенциальную сложность алгоритма распознавания:

$$\gamma = \frac{m}{2\sqrt{2}} = \frac{G'_{\min} n}{A2\sqrt{2}}. \quad (5)$$

Отказы ФЧЭ, возникающие в процессе эксплуатации МФПУ, могут быть вызваны как внешними (ионизирующее излучение, температурные перепады и др.), так и внутренними факторами (несовершенство технологии, близость к предельным режимам и т. п.). Потеря части фоточувствительных элементов на проекции объекта уменьшает число различаемых пар линий. Для компенсации снижения разрешения, вызванного отказами фотоприемников, необходимо ввести некоторую избыточность их числа ( $m \geq m^*$ ,  $n \geq n^*$ ) либо использовать более сложные алгоритмы распознавания (если этим можно ослабить требование по величине  $\gamma^*$  настолько, чтобы даже в случае отказов выполнялось условие  $\gamma > \gamma^*$ ). Естественно, что вызванное этими приемами снижение оперативности обработки не должно выходить за пределы допустимого, определенного условием (1).

Рассмотрим вначале случай аппаратной компенсации неисправности путем введения избыточности ФЧЭ. Если значение  $n$  превышает минимально необходимое ( $n > n^*$ ), то при кратности отказов  $l < l_{\max}$  становится возможным:

- 1) распознавание более удаленных и менее габаритных объектов;
- 2) решение более сложных задач распознавания, чем вытекающие из заданного значения  $\gamma^*$ ;
- 3) использование менее сложных и, следовательно, более оперативных алгоритмов (это может привести к увеличению нижнего предела допускаемого уровня сложности задачи распознавания  $\gamma^*$  до величины  $\gamma$ );
- 4) создание запаса в достигаемом разрешении, поскольку отказ некоторого числа элементов  $l \leq l_{\max}$ ,  $l_{\max} = m - m^*$ , не выводит систему за нижний предел допускаемого уровня сложности задачи распознавания.

В [1, 4] определена функция потенциальной живучести необслуживаемой системы. Отказавшие в процессе эксплуатации элементы фотоматрицы не могут быть оперативно восстановлены или заменены, что дает основание отнести ее к категории необслуживаемых. Тогда, если надежность свойства ФЧЭ характеризуется интенсивностью отказов  $\lambda$  и задано время  $t_v$ , сохранения фотоприемной системой свойства отказоустойчивости, значение показателя отказоустойчивости матрицы определяется избыточностью числа элементов в строке (столбце) матрицы:

$$l_{\max} = m - m^* = (n - n^*) \frac{G'_{\min}}{A} = \frac{n^* (e^{\lambda t_v} - 1) G'_{\min}}{A} = \frac{n(1 - e^{-\lambda t_v}) G'_{\min}}{A}.$$

При этом значение показателя потенциальной живучести  $R_l(\gamma)$  фоточувствительной матрицы получено из (2) и определяется выражением

$$R_l(\gamma) = \frac{\bar{\gamma}_l}{\gamma} \frac{l_{\max} - l}{l_{\max}} = \frac{\bar{m}_l}{m} \frac{l_{\max} - l}{l_{\max}}. \quad (6)$$

Здесь  $\bar{\gamma}_l = \bar{m}_l/2$  – среднее значение критерия Джонсона по горизонтали (вертикали) для минимальной проекции  $G'_{\min}$  объекта при кратности отказов в строке (столбце)  $l \leq l_{\max}$ ;  $\gamma = m/2$  – исходное число ФЧЭ на этой проекции. Необходимо учесть также, что не все  $l$  отказавших элементов строки (столбца) попадают на эту проекцию. Поэтому значения  $\bar{\gamma}_l$ ,  $\bar{m}_l$  определяются как средневзвешенные для всех возможных сочетаний  $C_n^l = \frac{n!}{l!(n-l)!}$  расположе-

ния  $l$  отказов в строке (столбце) из  $n$  элементов:

$$\bar{m}_l = \frac{\sum_{i=0}^l (m-i) C_m^i C_{n-m}^{l-i}}{C_n^l}.$$

При  $l=1$

$$\bar{m}_1 = m \frac{n-m}{n} + (m-1) \frac{m}{n} = m \frac{n-1}{n},$$

а при  $l=2$

$$\bar{m}_2 = (m C_{n-m}^2 + (m-1) C_m^1 C_{n-m}^1 + (m-2) C_m^2) / C_n^2 = m \frac{n-2}{n}.$$

Тогда из (6) получим

$$R_1(\gamma) = \frac{n-1}{n} \frac{l_{\max}-1}{l_{\max}}, \quad R_2(\gamma) = \frac{n-2}{n} \frac{l_{\max}-2}{l_{\max}}.$$

Несложно показать, что при  $l \leq l_{\max}$

$$\bar{m}_l = m \frac{n-l}{n}, \quad R_l(\gamma) = \frac{(n-l)(l_{\max}-l)}{n l_{\max}}.$$

Несмотря на то что величина  $m$ , обусловленная, как указано выше, габаритами, удаленностью и ракурсами объекта, в явном виде не входит в полученное для  $R_l(\gamma)$  выражение, это выражение нельзя использовать для характеристики живучести произвольной фотоприемной матрицы с заданными значениями  $n$  и  $n^*$ . Значения  $n$  и  $n^*$  определяются с учетом сложности задачи распознавания  $\gamma$ , ракурсно-габаритных размеров проекции распознаваемых объектов и линейного размера матрицы  $A$  (выражения (4) и (5)).

Полученные соотношения указывают на возможность использования в фотоприемной системе изначально дефектных матриц, если в них соотношение между линейным размером  $A$  матрицы и числом  $n$  ФЧЭ, а также максимальное число  $l_0$  дефектных элементов в строке (столбце) удовлетворяют за-

данным критериям отказоустойчивой работы, уровню сложности задачи распознавания и диапазону изменения ракурса объекта:

$$\bar{m}_{l_0} = m \frac{n-l_0}{n}, \quad l_{\max} = m-l_0-m^*, \quad \bar{m}_l = m \frac{n-l_0-l}{n},$$

$$R_l(\gamma_{l_0}) = \frac{n-l_0-l}{n-l_0} \frac{m-l_0-m^*-l}{m-l_0-m^*}.$$

Экспериментальные исследования на транспьютерной вычислительной системе [8, 9] показали, что повышение требований к отказоустойчивости обработки больших информационных массивов адекватно возрастающим при этом возможностям в использовании средств отказоустойчивого функционирования, и выявили существенные различия в значениях достоверности и времени распознавания для различных сочетаний алгоритмов обработки изображений и идентификации объектов. Это позволило поставить задачу повышения отказоустойчивости ФС путем включения в состав системы обработки изображения средств алгоритмической реконфигурации прикладных подсистем.

**3. Отказоустойчивая регистрация изображений.** Процесс регистрации изображения включает в себя фокусирование фотонного потока на плоскость фотоприемной матрицы (линейные фотоприемники могут быть рассмотрены как частный случай нижеизложенного), преобразование элементами матрицы энергии фотонов в электрические заряды, усиление и фильтрацию аналоговых сигналов, снимаемых с элементов матрицы, и передачу их для дальнейшего оцифровывания.

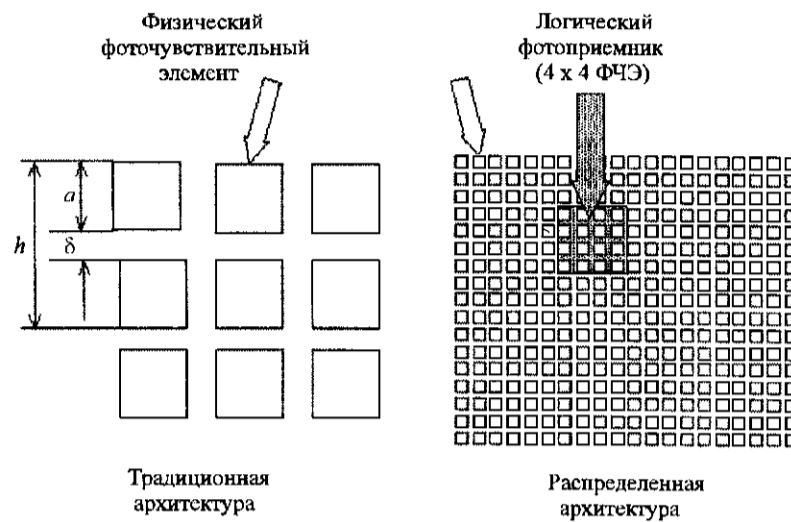
Выше была проведена оценка отказоустойчивости и живучести фотоприемных матриц с традиционной архитектурой, в которых линейный размер  $a$  фоточувствительного элемента из-за оптической дифракции ограничен снизу диаметром  $2r_0$  центрального диска Эри (диаметром оптического пятна, в котором сосредоточено до 84 % световой энергии) [10]:

$$a \geq 2r_0 \approx 2,44\lambda \frac{f}{D}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $f$  и  $D$  – фокусное расстояние и диаметр входного отверстия оптической системы соответственно. Кроме этого фундаментального соотношения (7) имеют место ограничения, обусловленные несовершенством технологии, например: неоднородность параметров в матрице возрастает с уменьшением площади ее элементов, уменьшение площади фотоприемника снижает величину снимаемого с него сигнала и т. п. Это привело к тому, что проблемы создания фотоприемных матриц с размерами фотоприемников, меньшими максимального в заданном спектральном диапазоне диаметра оптического пятна, оказались в стороне от исследований и разработок.

Если же посмотреть на ФЧЭ как на устройство, к которому предъявлено требование отказоустойчивости, то очевидным становится необходимость перехода от локальных принципов реализации фотоэлементов к распределенным (см. рисунок). Это означает, что фотоэлемент для заданного спектрального диапазона может быть представлен совокупностью  $m^2$  элементарных фотоприемников, шаг следования  $h'$  между которыми в  $m$  раз меньше  $a$ , а





линейный размер  $a' = a/m - \delta'$ ; здесь  $\delta'$  – линейный зазор между элементарными фотоприемниками. Совокупный сигнал, снимаемый с такого распределенного фотоэлемента, может быть получен суммированием  $m^2$  элементарных фотосигналов:

$$U_{\Sigma} = \sum_{i,j=1}^{i,j=m} (U_{ij})_{\Sigma} \quad (8)$$

Из выражения (8) видно, что суммарный сигнал с таких ФЧЭ не только не уменьшен в сравнении с локальной реализацией чувствительного элемента, но и может быть алгоритмически или аппаратно увеличен выбором соответствующего значения  $m$ . Для простоты рассмотрения здесь и далее принята квадратная конфигурация логических и физических фотоэлементов; для прямоугольной и любой другой конфигурации соответствующие выражения несложно скорректировать.

Итак, если считать, что суммарный сигнал с распределенного (логического) фотоэлемента может быть реставрирован при числе отказов не более чем  $l_{\max} = km^2$ ,  $k < 1$  (отказоустойчивость  $L_{\max}$  такого ФЧЭ равна значению  $l_{\max}$ ), то живучесть для кратности отказов  $l \leq km^2$  составляет

$$R_{ls} = \frac{(m^2 - l)(km^2 - l)}{km^4}$$

Учитывая, что в традиционных фотоприемных матрицах фотоприемники не являются отказоустойчивыми ( $l_{\max} = 0, R_{ls} = 0$ ), а в рассматриваемом случае они переходят в разряд логических элементов и приобретают новое качество – отказоустойчивость ( $l_{\max} > 0, R_{ls} > 0$ ), то:

– фотоматрицы, состоящие из отказоустойчивых логических фотоприемников, обладают существенно более высокими значениями показателей живучести и отказоустойчивости, нежели матрицы с традиционной архитектурой;

– одинаковые значения показателей живучести и отказоустойчивости в матрицах с логическими элементами достигаются при меньшей (или нулевой) избыточности числа логических ФЧЭ в сравнении с традиционными матрицами.

Последнее утверждение означает, что создание отказоустойчивых многоэлементных устройств на основе использования архитектуры логических фотоприемников может потребовать меньшей площади кристалла, нежели создание аналогичных по отказоустойчивости устройств с традиционной архитектурой фотоприемников.

Ниже будет рассмотрено влияние предложенной в настоящей статье архитектуры распределенных фотоприемников на другие существенные параметры матрицы.

**4. Потенциальные параметры матричных фотоприемников с распределенной архитектурой.** Используемые в практике показатели качества МФПУ зачастую избыточны, взаимозависимы и могут быть определены друг через друга. Для предварительного анализа предлагаемой архитектуры выделим лишь некоторые из них, считая остальные параметры не слишком отличающимися от традиционных (по темновому току, спектральной чувствительности, инерционности, геометрическому шуму) вследствие их большей зависимости от качества применяемых материалов и технологии. Кроме того, считаем, что входные цепи интегральной системы считывания, непосредственно соединенные с ФЧЭ, оптимизированы с позиций достижения минимального эквивалентного шумового заряда для заданных условий применения.

*Размер фотоприемника* определяет величину снимаемого в заданном спектральном диапазоне сигнала, а также его динамический диапазон и разрешение матрицы. Следует отметить, что увеличение числа и уменьшение площади элементарных физических фотоприемников возможно лишь до некоторых пределов, определяемых фундаментальными физическими или актуальными технологическими ограничениями. Фундаментальные физические ограничения в реализации элементарных фотоприемников с минимальными линейными размерами в настоящее время, по-видимому, не определены из-за ориентации на довольно высокие значения линейных размеров, обусловленных (7). Поэтому существующие сейчас ограничения не носят фундаментального характера и определяются технологическими возможностями и архитектурой фотоприемных матриц, включающей в себя схемы считывания и обработки фотосигнала. В плане технологической реализации такое уменьшение линейных размеров наиболее актуально, по-видимому, для фотоприемных матриц среднего и дальнего ИК-диапазона и наиболее затруднено для видимого диапазона.

Величина интегрального сигнала, снимаемого с логического ФЧЭ, прямо пропорциональна его суммарной площади (числу и площади образующих его физических элементов). Так как логический ФЧЭ образуется произвольно заданной совокупностью физических фоточувствительных площадок, то площадь распределенного фотоприемника и его геометрическая конфигурация, а следовательно, и величина интегрального сигнала могут варьироваться программно-алгоритмически. Для специальных приложений с быстротеменяющимися сигнальным и фоновым потоками могут потребоваться аппаратная реализация и дифференцированная (по месту на матрице) адаптация конфигурации распределенного ФЧЭ.

*Размер кристалла.* Если  $\delta$  – зазор между ФЧЭ обычной матрицы, а  $\delta'$  – зазор между элементами логического ФЧЭ, то изменение линейного размера кристалла  $A$  составит  $n(m\delta' - \delta)$ . Таким образом, при  $\delta' = \delta/m$  размер кристалла МФПУ в предлагаемой реализации не увеличивается. Можно предположить, что переход в область субмикронных технологий позволит свести возможное увеличение размера кристалла до долей процента при требуемом значении  $m$ . При этом следует учесть, что, как показано выше, необходимость удовлетворения требованиям отказоустойчивости посредством предложенной архитектуры МФПУ может привести к использованию кристаллов даже меньшей в сравнении с традиционной архитектурой площади. Таким образом:

- требования к однородности полупроводниковых материалов и воспроизводимость параметров ФЧЭ будут не более жесткими, чем в обычных матрицах, так как площади логического и физического ФЧЭ сравнимы, а реализация свойства отказоустойчивости на уровне фотоприемной матрицы может быть достигнута при меньшей площади кристалла;

- процент выхода годных при производстве матриц с распределенной архитектурой может быть более высоким вследствие того, что каждый логический ФЧЭ является живучим, так как представляет собой совокупность  $m^2$  (причем значение  $m$  программируемо) физических элементов.

*Динамический диапазон и отношение сигнал/шум.* Считая шумы фоточувствительных элементов в составе логического фотоприемника некоррелированными, динамический диапазон (ДД) логического фотоприемника по аналогии с традиционным определением динамического диапазона ФЧЭ [6] определим отношением интегрального значения сигналов насыщения с составляющих его элементарных фотоприемников к суммарной величине среднеквадратичных значений шумов этих элементов:

$$DD = U_{сн} / U_{шЭ} = \frac{\sum_{i,j=1}^{i,j=m} (U_{ij})_{сн}}{\sum_{i,j=1}^{i,j=m} (U_{ij})_{шЭ}}$$

Получение выходного сигнала с логического ФЧЭ суммированием первичных сигналов от элементарных фотоприемников усредняет влияние знакопеременных шумов, а также компенсирует структурную неоднородность. Эти предположения дают возможность в первом приближении пренебречь влиянием геометрического шума и наводок переключения при последующем анализе потенциальных параметров МФПУ с предлагаемой архитектурой.

Так как величина сигнала с логического ФЧЭ получается суммированием сигналов с физических фотоэлементов за время накопления, близкое к заданному времени формирования кадра  $t_k$ , а число этих элементов можно выбрать в соответствии с текущей ситуацией (уровнями сигнального и фонового излучений, динамикой сцены и т. п.), пиковое значение сигнала, снимаемого с логического ФЧЭ, будет не хуже, чем в локальной (нераспределенной) реализации ФЧЭ. При этом следует ожидать увеличения отношения сигнал/шум в  $m$  раз ( $m^2$  – число физических элементов в логическом ФЧЭ) по сравнению с традиционной архитектурой, поскольку это отношение пропорционально корню квадратному из числа элементов матрицы [7]. Кроме того, в режиме ограничения фоном (VLP-режиме) ФЧЭ может обеспечить высокое значение отношения сигнал/шум, если время накопления сигнала доста-

точно велико. Для случая, когда сигнал накапливается на МДП-емкости, время накопления заряда  $t_n$  не должно быть больше времени заполнения потенциальной ямы. В рассматриваемой архитектуре площадь  $S$  элементарного фотоприемника в сравнении с традиционной уменьшена в  $m^2$  раз. Ниже показано, что такое уменьшение не сокращает допустимое время накопления.

Максимальное количество носителей заряда  $N_{\max}$  в потенциальной яме МДП-емкости определяется выражением

$$N_{\max} = \frac{C_{\text{ox}} V_G}{q} = \frac{\epsilon_{\text{ox}} V_G}{qd} S,$$

где  $C_{\text{ox}}$  – геометрическая емкость,  $V_G$  – приложенное напряжение,  $q$  – заряд электрона,  $\epsilon_{\text{ox}}$  – диэлектрическая проницаемость окисла,  $S$  – площадь МДП-емкости. Заряд насыщения определяется напряженностью электрического поля  $V_G/d$ , максимально допускаемой для используемого диэлектрика. Для  $\text{SiO}_2$  ( $\epsilon_{\text{ox}} = 3,9\epsilon_0$ ) эта величина составляет около  $10^6$  В/см. Тогда  $N_{\max} = 2 \cdot 10^{12} S$ . При освещении ФЧЭ величина заряда в первом приближении составляет

$$N = (I_{\text{ф}} + I_{\text{с}}) \eta S t_n \sin^2 \theta,$$

где  $I_{\text{ф}}$  и  $I_{\text{с}}$  – плотности фонового и сигнального потоков,  $\eta$  – квантовая эффективность,  $\theta$  – апертурный угол. Для системы считывания на основе ПЗС оптимальным считается  $N \approx N_{\max}/3$ . Тогда

$$t_n = \frac{N_{\max}}{3(I_{\text{ф}} + I_{\text{с}}) \eta S \sin^2 \theta} = \frac{2 \cdot 10^{12}}{3(I_{\text{ф}} + I_{\text{с}}) \eta \sin^2 \theta}. \quad (9)$$

Итак, из выражения (9) видно, что время накопления, соответствующее максимальному отношению сигнал/шум фотоприемника, определяется главным образом суммарной величиной фонового и сигнального потоков, а также используемыми материалами и технологией, а следовательно, не зависит от геометрических размеров фотоприемника и в распределенной реализации фотоприемника не снижается. Исходя из равенства сигналов, снимаемых с локального и распределенного (логического) фотоприемников, легко убедиться, что интегральная шумовая составляющая сигнала с логического ФЧЭ также не превышает соответствующей составляющей с локального фотоприемника. Это означает сравнимость динамических диапазонов рассматриваемых вариантов реализации фотоприемных матриц.

В отличие от традиционных схем, где на фоточувствительную площадку фотоприемника попадает несколько световых пятен, в матрице с предлагаемой архитектурой одно световое пятно фиксируется несколькими элементарными фотоприемниками. Очевидно, что это принципиальное отличие позволит воссоздать структуру сигнальных световых пятен (определить их границы). Появляется возможность, во-первых, выделить элементы логического фотоприемника, находящиеся на этих пятнах и вне их, т. е. потенциально приблизиться к разрешению оптической системы. Во-вторых, величина сигнала с затененных элементов (находящихся вне оптических пятен) позволит в процессе считывания алгоритмически или аппаратно оценивать величину

суммарных шумов (фоновый сигнал и его флуктуации, установочные шумы, шумы переноса,  $1/f$ -шум, темновой шум и т. п.) и использовать эту величину в качестве опорной для выделения только полезного сигнала с окрестных физических элементов.

Кроме того, ожидается, что наличие  $m^2$  физических элементов на одно оптическое пятно позволит для достаточно больших значений  $m$  допустить возможность взаимного пересечения рядом расположенных логических элементов (например, крайние правые фотоэлементы одного логического ФЧЭ являются также крайними левыми элементами другого). В этом случае на одном и том же кристалле можно, во-первых, не меняя площади логических фотоприемников, алгоритмически увеличить их число в каждой строке (столбце) матрицы от  $n/m$  до  $(n-1)/(m-1)$ , а во-вторых, при том же количестве логических ФЧЭ, равном  $n/m$ , увеличить площадь каждого в  $(1+2/m+1/m^2)$  раз. Для матриц с обычной архитектурой, где площадь ФЧЭ и их число связаны отношением обратной пропорциональности, это является парадоксом. Таким образом, при логической реализации фотоприемников появляются дополнительные архитектурно-алгоритмические резервы в росте величины сигнала и динамического диапазона ФЧЭ.

*Диапазон допускаемых тактовых частот* определяет пределы изменения частоты кадров и потенциальные возможности регистрации быстроменяющихся сцен. Уменьшение тактовой частоты может привести к искажениям (смазанности изображения), вызванным динамикой сцены и тем, что элементы кадра фиксируют различные временные промежутки. Увеличение числа фотоприемников в  $m^2$  раз существенно повышает потенциальные возможности анализа изображений быстроменяющихся сцен, но требует или соответствующего увеличения тактовой частоты при сохранении значений  $t_k$  и  $t_n$ , или регистрации изображений в малокадровом режиме, не требующем увеличения тактовой частоты. В последнем случае возможно существенное увеличение отношения сигнал/шум и динамического диапазона как элементарных, так и логических фотоприемников, связанное с увеличением времени накопления. Максимальное значение частоты опроса ФЧЭ определяется параметрами интегральной системы считывания и имеет свои пределы [11–14]: несколько десятков мегагерц для ПЗС и около 100 МГц для КМОП-систем считывания. Поэтому снижения тактовых частот до приемлемых значений можно достичь введением в архитектуру матрицы параллельных каналов считывания. В этом случае тактовая частота определяется выражением  $f_T = \frac{(nm)^2}{t_n w}$ , а  $t_n$  – выражением (9); условие  $t_k \geq t_n$  тривиально и не

требует обсуждения. Здесь  $w$  – ширина выборки сигналов с фотоприемной матрицы (число каналов считывания). При  $w = m^2$  тактовая частота МФПУ с распределенной архитектурой фотоприемников не превышает обычных значений. Выше отмечено, что уменьшение в  $m^2$  раз площади элементарного фотоприемника увеличивает отношение сигнал/шум в  $m$  раз [7]. Это предполагает возможность уменьшения времени накопления заряда в элементарном фотоприемнике до значений, при которых отношение сигнал/шум достигнет традиционных значений, и является дополнительным архитектурным ресурсом повышения частоты опроса фоточувствительных элементов.

*Спектральный диапазон* также может быть алгоритмически настроен на область приложений и сдвинут как вниз к «горячим» объектам путем умень-

шения числа элементов в логическом ФЧЭ, так и вверх к «холодным» фоновым объектам при увеличении  $m$ . Это равносильно подстройке значения площади фотоприемника под диаметр оптического пятна, определяемый параметрами применяемой оптической системы и спектром излучения конкретного объекта из заданного множества селективируемых объектов. Из (7) видно, что изменение линейного размера логического фотоприемника в пределах размеров оптических пятен для минимальной и максимальной длин волн заданного спектрального диапазона принимаемого фотонного потока изменяет спектральную чувствительность, т. е. обладает фильтрующими свойствами. Это свойство можно использовать для анализа спектрального диапазона сигнального и фонового потоков. Очевидно, что для этого размер элементарного фотоприемника  $a'$  должен быть не более  $(\lambda_{\max}/\lambda_{\min} - 1)r_0$  или быть менее  $1,22(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})f/D$ .

Итак, предварительный анализ основных параметров многоэлементных фотоприемных устройств с логическими фотоприемниками свидетельствует о том, что не только существенно повышаются живучесть и отказоустойчивость таких устройств, но и создаются предпосылки для улучшения практически всех рассмотренных выше параметров. Возможно, что реализация этих предпосылок изменит соотношение между технологическими приемами улучшения исходного изображения и программно-алгоритмическими методами освобождения от искажений. Естественно, что уменьшение размеров физических фотоприемников и соответствующий этому уменьшению рост их количества поставят перед технологами ряд проблем. Необходимо также решить вопросы о распределении функций формирования результирующего сигнала с логического фотоприемника между программными и аппаратными средствами, об актуализированном управлении адаптацией МФПУ к текущим параметрам регистрируемых сцен.

**Заключение.** Методы анализа и синтеза отказоустойчивых систем, основанные на общепринятых надежностных показателях, малоинформативны и не дают сведений о регенеративных способностях системы в потоке отказов. Предложенный подход к моделированию отказоустойчивых систем регистрации и обработки изображений основан не на надежностных характеристиках составных элементов, а на аксиоме неизбежности их отказов. При этом надежностные характеристики могут использоваться для оценки минимального уровня отказоустойчивости, необходимого для обеспечения работоспособности системы в течение требуемого времени сохранения системой свойства живучести или заданного периода проведения регламентных работ.

Предложен комплексный подход к параметрической организации фотоприемных систем, основанный на подборе таких параметров функциональных компонентов, сочетание которых приближает к требуемым значениям целевого функционала достоверности и актуальности с учетом возникающих в процессе эксплуатации отказов с допустимой кратностью. Используемый подход впервые позволяет количественно оценить отказоустойчивость систем, а следовательно, предоставляет возможность синтеза таких систем и их компонентов.

Моделирование архитектуры многоэлементных фотоприемных устройств впервые ориентировано на повышение ее адекватности архитектуре отказоустойчивых параллельных систем обработки изображений. Эксперименты по моделированию параллельной обработки фотоизображений

на транспьютерной системе выявили физические и логические резервы в наращивании отказоустойчивости и быстродействия фотоприемных систем.

В работе показано, что традиционный подход к реализации многоэлементных фотоприемных устройств, основанный на предположении о незыблемости минимальных размеров фоточувствительных элементов, ограниченных снизу явлением оптической дифракции, входит в противоречие с требованием обеспечения отказоустойчивости на уровне отдельных фотоприемников. Чтобы снять это противоречие, предложено представление о логическом фотоприемнике как о совокупности элементарных фоточувствительных площадок, размеры которых меньше минимального диаметра оптического пятна исследуемого спектрального диапазона. Число таких элементарных фотоприемников, составляющих логический ФЧЭ, их геометрия и взаимное расположение, тактовая частота и время накопления фотосигнала могут быть адаптированы к параметрам исследуемого объекта и фона, к динамике изменения сцен и т. п.

Проведен предварительный анализ основных параметров МФПУ предлагаемой архитектуры. Качественные и сравнительные количественные оценки этих параметров дают основания утверждать, что область применения таких устройств не будет ограничена лишь отказоустойчивыми приложениями, а будет расширена за счет приложений, требующих повышенного разрешения, ограниченного только оптикой, за счет приложений, требующих регистрации быстроменяющихся сцен, спектрального анализа или селекции объектов с заданными спектральными характеристиками, и многих других.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелентьев В. А. Оценка потенциальной и структурной живучести вычислительных систем // Электронное моделирование. 1995. 17, № 1. С. 78.
2. Шнитман В. Отказоустойчивые компьютеры компании Stratus // Открытые системы. 1998. № 1. С. 1.
3. Мелентьев В. А., Черепов Е. И., Чистохин И. Б. Отказоустойчивость систем регистрации и обработки изображений // Тр. 5-й Междунар. конф. «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии» (РОАИ-5-2000). Т. 4: Программно-аппаратные средства в системах распознавания образов и обработки изображений. Самара: ИПО Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. С. П. Королева, 2000. С. 739.
4. Melentiev V. A., Gryaznov N. G. Analysis of potential and structural robustness of distributed computer systems // Proc. of the 15th IMACS World Congress of Scientific Computation, Modeling and Applied Mathematics, Berlin, August, 1997. V. 6: Application in Modeling and Simulation. P. 341.
5. Мелентьев В. А. Анализ эффективности и оптимизация параллельных программ для распределенных вычислительных систем // Автометрия. 1998. № 2. С. 103.
6. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения: Сб. статей /Под ред. Р. А. Суриса. М.: Мир, 1979.
7. Богомолов П. А., Сидоров В. И., Усольцев И. Ф. Приемные устройства ИК-систем. М.: Радио и связь, 1987.
8. Тарков М. С. Организация отказоустойчивых параллельных вычислений в транспьютерной системе обработки изображений // Научное приборостроение. 1995. 5, № 3-4. С. 74.

9. Мелентьев В. А., Тарков М. С., Маркус Е. Д. Анализ эффективности параллельной реализации решения задач механики сплошной среды на транзьютерной вычислительной системе с распределенным управлением // Тр. Шестого междунар. семинара «Распределенная обработка информации» – РОИ'98. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. С. 137.
10. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. М.: Мир, 1988.
11. Scribner D. A., Krueger M. R., Killiany M. Infrared focal plane array technology // Proc. IEEE. 1991. 79, N 1. P. 66.
12. Бокс Н. Э., Черепов Е. И. Мультиплексор на основе криогенных транзисторов для гибридного ФПУ сверхдальнего ИК-диапазона // Автометрия. 1998. № 1. С. 3.
13. Akiyama A., Sasaki T. et al. 1040 × 1040 infrared charge sweep device imager with PtSi Schottky-barrier detectors // Opt. Eng. 1994. 33, N 1. P. 64.
14. Mansourian B., Yee H.-Y., Huang S., Fossum E. A 250 mW, 60 f/s 1280 × 720 Pixel 9b CMOS Digital Image Sensor // ISSCC Digest of Tech. Papers, 1999, February. P. 310.

*Институт физики полупроводников СО РАН,  
E-mail: melva@isp.nsc.ru*

*Поступила в редакцию  
21 марта 2001 г.*

---

**Реклама продукции в нашем журнале – залог Вашего успеха!**