

УДК 681.78.01

# ВЫБОР РЕЖИМА РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С МАТРИЧНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ<sup>1</sup>

**Г. Н. Мальцев,**

доктор техн. наук, профессор

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

*Рассматриваются особенности выбора размера элемента матричного фотоприемника и времени регистрации кадра, характеризующие режим регистрации изображений в оптико-электронных информационных системах. Связанные с этими параметрами шум дискретизации и смаз изображения описываются одинаковыми частотными характеристиками фильтра пространственных частот изображения. Отмечены различия выбора режима регистрации некогерентных и спекл-изображений в оптических информационных системах с естественной и лазерной подсветкой.*

*Features of the choice of the size of matrix photodetector element and the staff registration time, which describing a images registration mode in optical-electronic information systems, are considered. Connected with these parameters noise of digitization and blur of images are described by identical frequency characteristics of image spatial frequencies filter. Distinctions of the choice of registration mode of non-coherent images and speckle-images in optical information systems with natural and laser illumination are emphasized.*

Оптические информационные системы (ОИС) получают широкое распространение в качестве средств дистанционного зондирования, мониторинга и обзора пространства [1–3]. Как правило, в ОИС формируются изображения наблюдаемых объектов (источников излучения, сцен), которые в последующем анализируются, преобразуются или обрабатываются в соответствии с назначением системы. Характеристики ОИС, такие как потенциальная точность и разрешающая способность, в значительной степени зависят от качества формируемых в ОИС изображений и режима их регистрации; при этом выбор режима регистрации необходимо производить с учетом условий формирования регистрируемых изображений и особенностей их последующей обработки.

Для регистрации изображений в большинстве современных ОИС используются матричные фотоприемники на основе приборов с зарядовой связью. При выбранной оптической схеме ОИС и заданных условиях наблюдения характеристики и режим работы матричного фотоприемника следует выбирать таким образом, чтобы в процессе регистрации имело место минимально возможное или допустимое снижение качества изображения. Применительно к рас-

сматриваемым ОИС, формирующим изображения, будем характеризовать режим регистрации размером элемента матричного фотоприемника и временем регистрации кадра. От выбора указанных параметров зависит субъективное качество и количественная величина линейного разрешения в зарегистрированном изображении, определяющие возможности его последующей обработки и дешифрирования.

Размер элемента матричного фотоприемника непосредственно влияет на линейное разрешение в зарегистрированном изображении, поскольку распределение интенсивности оптического изображения  $I(\vec{r})$  регистрируется и анализируется в виде дискретной функции

$$I_{pi}(\vec{r}) = \frac{1}{A} \sum_{n=1}^N \int M_n(\vec{r}) I(\vec{r}) d\vec{r}, \quad (1)$$

где  $M_n(\vec{r})$  – весовая функция, задаваемая в пределах  $n$ -го элемента (пикселя) матричного фотоприемника;  $A$  – площадь элемента;  $N$  – число элементов в матрице;  $\vec{r}$  – координата в плоскости изображения ОИС.

Время регистрации изображения  $\Delta t$  влияет на линейное разрешение при наблюдении за движущимися объектами, когда распределение интенсивности формируемого оптического изображения является функцией времени  $t$  и вектора скорости наблюдаемого объекта  $\vec{v}$ . В результате в регистрируемом изображении

<sup>1</sup> При поддержке Совета по грантам при Президенте РФ. Грант № ИШ-2355.2003.9.

$$I_{p2}(\vec{r}) = \frac{1}{\Delta\tau} \int_0^{\Delta\tau} I(\vec{r} - \vec{v}tF/R) dt, \quad (2)$$

где  $R$  – дальность до объекта;  $F$  – фокусное расстояние оптической системы, происходит смаз в направлении вектора скорости  $\vec{v}$ .

Если величина смаза изображения  $\Delta r_{см} = |\vec{v}| \Delta\tau F/R$  соизмерима или превосходит размер элемента разрешения оптической системы, то имеет место существенное ухудшение разрешающей способности. Существуют методы устранения смаза зарегистрированного изображения в процессе его последетекторной обработки, однако возможности этих методов ограничены. Поэтому при формировании изображений наблюдаемых объектов в ОИС необходимо установить такой режим регистрации, при котором будет обеспечиваться допустимая величина смаза при предъявляемых требованиях к качеству изображений.

При рассмотрении процесса формирования изображений как передачи пространственных частот [2,4] влияние дискретизации изображения матричным фотоприемником и смаза изображения при движении наблюдаемого объекта описываются одинаковой частотной характеристикой фильтра пространственных частот изображения, которая имеет вид функции  $\sin(x)/x$  по каждой координате.

Матричный фотоприемник при регистрации изображения действует как фильтр пространственных частот с частотной характеристикой

$$T_1(k_x, k_y) = \frac{\sin(\pi a k_x)}{\pi a k_x} \frac{\sin(\pi a k_y)}{\pi a k_y}, \quad (3)$$

где  $a$  – линейный размер элемента (площадь элемента  $A = a \times a$ ),  $k_x, k_y$  – пространственные частоты, соответствующие координатам  $x$  и  $y$  в плоскости изображения.

Соотношение между размером элемента матрицы и размером дифракционного элемента разрешения характеризует коэффициент  $k = aD/(\lambda F)$ , где  $D$  – диаметр приемной апертуры ОИС,  $\lambda$  – рабочая длина волны. На практике размер элементов изображения, регистрируемых матричным фотоприемником, может определяться объединением отсчетов нескольких элементов матрицы, а значение  $k$  выбираться за счет изменения фокусного расстояния  $F$ .

Смаз изображения движущегося объекта при времени регистрации  $\Delta\tau$  описывается действием фильтра пространственных частот с частотной характеристикой

$$T_2(k_x, k_y) = \frac{\sin(\pi v_x \Delta\tau k_x F/R)}{\pi v_x \Delta\tau k_x F/R} \frac{\sin(\pi v_y \Delta\tau k_y F/R)}{\pi v_y \Delta\tau k_y F/R}, \quad (4)$$

где  $v_x, v_y$  – составляющие вектора скорости наблюдаемого объекта  $\vec{v}$  по координатам  $x$  и  $y$ .

Практически величина смаза в регистрируемом изображении движущегося объекта может быть уменьшена как за счет уменьшения времени регистрации изображения, так и за счет углового сопровождения объекта в процессе на-

блюдения. В последнем случае в качестве составляющих вектора скорости  $v_x$  и  $v_y$  в выражении (4) нужно использовать составляющие скоростной ошибки сопровождения наблюдаемого объекта  $\Delta\vec{v}$ .

Частотные характеристики (3) и (4) уменьшаются с увеличением  $k_x$  и  $k_y$  тем быстрее, чем больше значения  $a$  и  $\Delta\tau$ , поэтому для наилучшей передачи пространственных частот изображения размер элемента матричного фотоприемника  $a$  и время регистрации кадра  $\Delta\tau$  необходимо уменьшать. При этом влияние шума дискретизации, вызванного конечным размером элементов матричного фотоприемника  $a$ , эквивалентно влиянию смаза при времени регистрации кадра

$\Delta\tau = \frac{\sqrt{2aR}}{|\vec{v}|F}$  и направлении вектора скорости  $\vec{v}$  под углом  $45^\circ$  к осям координат  $x$  и  $y$ .

В условиях формирования и выбора режима регистрации изображений в ОИС с естественной (некогерентной) и с лазерной (когерентной) подсветкой имеются различия. При естественной подсветке, что соответствует пассивным ОИС, формируются некогерентные оптические изображения [3, 4]. При лазерной подсветке, что соответствует активным ОИС, формируются спекл-изображения с пятнистой структурой [1, 5].

Формирование некогерентного оптического изображения описывается выражением

$$I(\vec{r}) = \left( \frac{1}{\lambda^2 R F} \right)^2 \int I_0(\vec{r}') \left| \int W_0(\vec{\rho}) \exp \left[ -i \frac{2\pi}{\lambda R} \left( \vec{r}' + \frac{R}{F} \vec{r} \right) \vec{\rho} \right] d\vec{\rho} \right|^2 d\vec{r}', \quad (5)$$

где  $I_0(\vec{r}')$  – интенсивность поля в картинной плоскости, определяемая формой наблюдаемого объекта;  $W_0(\vec{\rho})$  – апертурная функция; интегрирование по координате  $\vec{r}'$  в картинной плоскости осуществляется в пределах углового поля ОИС, а интегрирование по координате  $\vec{\rho}$  – в пределах апертурной функции  $W_0(\vec{\rho})$ .

Выражение (5) соответствует отсутствию искажений оптических сигналов в среде распространения; при этом распределение интенсивности некогерентного оптического изображения  $I(\vec{r})$  с точностью до дифракционных эффектов и масштабного преобразования соответствует распределению интенсивности поля в картинной плоскости  $I_0(\vec{r})$ .

Формирование спекл-изображения описывается выражением

$$I(\vec{r}) = \left( \frac{1}{\lambda^2 R F} \right)^2 \left| \int U_0(\vec{r}') \exp[i\psi(\vec{r}') \times \int W_0(\vec{\rho}) \exp \left[ -i \frac{2\pi}{\lambda R} \left( \vec{r}' + \frac{R}{F} \vec{r} \right) \vec{\rho} \right] d\vec{\rho} d\vec{r}' \right|^2, \quad (6)$$

где  $\psi(\vec{r}')$  – случайная фаза с равномерным распределением в интервале  $[0, 2\pi]$ , описывающая шероховатость поверхности наблюдаемого объекта, существенную при когерентной подсветке; остальные обозначения и пределы интегрирования те же, что и в выражении (5).

Распределение интенсивности (6) имеет спекл-структуру с единичным контрастом и характерным размером спекла (пятна)  $r_{сп} = \lambda F / \sqrt{S}$ , где  $S$  – площадь приемной апертуры. Форму наблюдаемого объекта характеризует огибающая спекл-структуры. У каждого отдельного изображения она искажена спекл-шумом, обусловленным флуктуациями амплитуд спеклов, а среднее по ансамблю реализаций шероховатой поверхности изображение соответствует формируемому при тех же условиях (форма объекта, размер приемной апертуры, действующие искажения) некогерентному изображению вида (5).

Рассмотрим выбор режима регистрации изображений наблюдаемых объектов по размеру элемента матричного фотоприемника  $a$ . Для этого оценим влияние на качество некогерентных и спекл-изображений шума дискретизации, обусловленного конечным размером элементов матричного фотоприемника. В дальнейшем эти результаты могут быть распространены на случай смаза изображения, описываемого при соответствующем выборе параметров  $a$  и  $\Delta t$  такой же частотной характеристикой фильтра пространственных частот изображения.

При формировании некогерентных изображений уменьшение размеров элементов матричного фотоприемника всегда приводит к улучшению качества изображения, однако при этом увеличиваются требуемое число элементов в матрице и тактовая частота опроса; кроме того, необходимо обеспечить идентичность характеристик всех элементов матрицы. При увеличении размеров элемента матричного фотоприемника увеличивается искажения, вносимые шумом дискретизации изображения, и его качество ухудшается.

В этом случае размер элемента матричного фотоприемника целесообразно выбирать из условия  $k = 0,5$ . Это непосредственно следует из теоремы Котельникова для пространственных частот [4]. По дискретизированному таким образом изображению  $I_{р1}(\bar{r})$  исходное изображение наблюдаемого объекта  $I(\bar{r})$  может быть восстановлено с точностью до дифракционного предела пространственного разрешения  $\Delta r = \lambda F / D$ .

При формировании спекл-изображений и их регистрации матричным фотоприемником при размерах элемента, соизмеримых с характерным размером спекла, происходит сглаживание спекл-структуры изображения, что субъективно улучшает качество изображения, поскольку информация о форме наблюдаемого объекта содержится в огибающей спекл-структуры. Однако при увеличении размеров элемента матричного фотоприемника и в спекл-изображениях начинает доминировать шум дискретизации и качество изображений ухудшается.

В этом случае размер элемента матричного фотоприемника целесообразно выбирать из условия  $k = 1,2 \div 1,5$ . Это следует из результатов исследования свойств спекл-изображений протяженных объектов [5]. Характерный размер спеклов  $r_{сп} = \lambda F / D$  и единичный контраст являются свойствами всех спекл-изображений. Поэтому при  $k < 1,2$  уменьшается степень сглажи-

вания спекл-структуры в регистрируемом изображении  $I_{р1}(\bar{r})$  вида (1), где распределение интенсивности изображения  $I(\bar{r})$  определяется выражением (6), а возможности выделения огибающей спекл-структуры, несущей информацию о форме наблюдаемого объекта, ограничиваются дифракционным пределом разрешающей способности когерентных оптических систем. При  $k > 1,5$  начинает проявляться нежелательное сглаживание огибающей спекл-структуры.

Следует отметить, что при регистрации спекл-изображений выбор размера элемента матричного ФПУ из условия  $k \approx 1,2$  оказывается близок к оптимальному по критерию минимума среднеквадратической ошибки («верности») изображения

$$V = \int |I(\bar{r}) - I_{р1}(\bar{r})|^2 d\bar{r} / \int |I(\bar{r})|^2 d\bar{r}, \quad (7)$$

где  $I(\bar{r})$  – дифракционное некогерентное изображение наблюдаемого объекта, определяемое выражением (5) при безаберрационной апертурной функции  $W_0(\bar{p})$ ; в случае формирования некогерентных изображений  $V$  стремится к своему минимальному значению  $V = 0$  при  $k \rightarrow 0$ .

В ОИС наблюдения, предназначенных для работы как в активном, так и в пассивном режимах и имеющих одно матричное фотоприемное устройство, целесообразно выбирать размер элемента матрицы исходя из условий регистрации некогерентных изображений в пассивном режиме работы, а для регистрации спекл-изображений в активном режиме работы предусматривать объединение отсчетов нескольких элементов. Если размер элемента матрицы выбран из условия  $k = 0,5$ , то при работе в активном режиме объединяются отсчеты 4–9 соседних элементов, что соответствует  $k = 1,0 \div 1,5$ . Технические возможности современных матричных фотоприемников позволяют реализовать такое управление элементами матрицы в зависимости от режима работы ОИС.

Таким образом, при регистрации некогерентных изображений следует выбирать размер элемента матричного фотоприемника  $a = 0,5\lambda F / D$ , а при регистрации спекл-изображений –  $a = (1,2 \div 1,5)\lambda F / D$ . Переходя к выбору времени регистрации кадра изображения  $\Delta t$  и учитывая взаимосвязь  $a$  и  $\Delta t$  как параметров частотных характеристик (3) и (4) пространственного фильтра изображения, получаем: при регистрации некогерентных изображений следует выбирать время регистрации кадра

$$\Delta t = 0,5 \frac{\sqrt{2\lambda R}}{|\bar{v}| D},$$

$$\text{а при регистрации спекл-изображений} - \Delta t = (1,2 \div 1,5) \frac{\sqrt{2\lambda R}}{|\bar{v}| D}.$$

При угловом сопровождении наблюдаемых объектов в качестве скорости  $v$ , определяющей величину смаза изображения, как отмечалось, следует использовать скоростную ошибку сопровождения наблюдаемого объекта  $\Delta \bar{v}$ . Оче-



видно, что за счет уменьшения  $\Delta \bar{v}$  можно в тех же самых условиях наблюдения предъявлять менее жесткие требования ко времени регистрации  $\Delta t$  и за счет совместного выбора параметров  $a$  и  $\Delta t$  обеспечивать требуемый режим регистрации наблюдаемых объектов по величине смаза. Это относится и к пассивному, и к активному режимам работы ОИС.

Величина  $\Delta \bar{v}$  связана с ошибкой углового сопровождения  $\Delta \dot{\theta}$  наблюдаемого объекта оптическим телескопом ОИС соотношением  $|\Delta \bar{v}| = \Delta \dot{\theta} R^2 / F$ . Анализ характеристик систем углового сопровождения наземных лазерных локаторов, предназначенных для работы с воздушно-космическими объектами, показывает, что ошибка углового сопровождения увеличивается с увеличением угловой скорости наблюдаемого объекта. При этом значение  $\Delta \dot{\theta}$  составляет единицы и доли процентов от угловой скорости наблюдаемого объекта  $\dot{\theta}$  [1, 6]. Для матричных фотоприемников, состоящих из нескольких сотен элементов по каждой координате, увеличение времени регистрации на два порядка означает уменьшение тактовой частоты опроса элементов с десятков мегагерц до сотен килогерц с соответствующим уменьшением шума регистрации.

При совместном влиянии шума дискретизации и смаза на качество изображений, формируемых в ОИС, выбор параметров  $a$  и  $\Delta t$  исходя из условий независимого учета рассматриваемых факторов приводит к уменьшению результирующей частотной характеристики фильтра пространственных частот изображения, принимающей по каждой координате вид  $\sin^2(x)/x^2$ , с сохранением положения первых нулевых минимумов на пространственной частоте  $k_{x,y} = 1/a$ . Субъективное качество изображения и оценки разрешающей способности ОИС при этом уменьшаются, поскольку большинство методик оценки разрешающей способности оптических систем, формирующих изображения, сводятся к определению «эффективной» ширины сквозной частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) или ее пороговых уровней [7, 8], а частотные характеристики пространственного фильтра изображения вида  $T_{1,2}(k_x, k_y)$  (3) и (4) являются составляющими сквозной ЧКХ.

Полученные соотношения и оценки позволяют обоснованно выбирать режим регистрации некогерентных оптических изображений и спекл-изображений в наземных ОИС обзора пространства с матричными фотоприемниками. Для реализации потенциальной разрешающей способности ОИС регистрация изображений должна происходить с соответствующим выбором размера элементов матричного фотоприемника и с принятием специальных мер по уменьшению смаза изображения движущихся объектов. При этом для пассивного и активного

режимов работы ОИС при выбранной оптической схеме и заданных условиях наблюдения имеются различия в выборе размера элементов матричного фотоприемника, обусловленные особенностями формируемых некогерентных оптических изображений (пассивный режим) и спекл-изображений (активный режим).

Рассмотренные условия наблюдения характерны для ОИС обзора пространства. Полученные результаты позволяют прогнозировать их разрешающую способность и информационные возможности при наблюдении за подвижными протяженными объектами, а также учитывать взаимосвязанные факторы, определяющие выбор режима регистрации изображений наблюдаемых объектов в ОИС. Так, при увеличении точности углового сопровождения наблюдаемых объектов может быть увеличено время регистрации кадра изображения, поскольку величина смаза изображения определяется обоими этими факторами. Уменьшение шума дискретизации изображения матричным фотоприемником однозначно связано с уменьшением размера его элементов, однако в пассивном и активном режимах работы ОИС рекомендуемые пределы уменьшения размера элементов отличаются в 2–3 раза. При этом условия уменьшения шума дискретизации изображения матричным приемником и условия уменьшения влияния смаза изображения могут быть взаимосвязаны между собой и рассмотрены с единых позиций, поскольку они описываются одинаковыми частотными характеристиками фильтра пространственных частот изображения.

## Литература

1. Матвеев И. Н., Протопопов В. В., Троицкий И. Н., Устинов Н. Д. Лазерная локация. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
2. Красильников Н. Н. Теория передачи и восприятия изображений. Теория передачи изображений и ее приложения. – М.: Радио и связь, 1986. – 248 с.
3. Грязин Г. Н. Оптико-электронные системы для обзора пространства. Системы телевидения. – Л.: Машиностроение, 1988. – 224 с.
4. Порфирьев Л. Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. – Л.: Машиностроение, 1988. – 388 с.
5. Бакут П. А., Мандросов Б. И., Матвеев И. Н., Устинов Н. Н. Теория когерентных изображений. – М.: Радио и связь, 1987. – 264 с.
6. Протопопов В. В., Устинов Н. Д. Инфракрасные лазерные локационные системы. – М.: Воениздат, 1987. – 176 с.
7. Кононов В. И., Федоровский Г. Д., Дубинский А. Д. Оптические системы формирования изображений. – Киев: Техніка, 1981. – 134 с.
8. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.