
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535

В. А. СОЛОМАТИН

ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВА В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ С МОЗАИЧНЫМ УГЛОВЫМ ПОЛЕМ

Обсуждаются особенности оптико-электронных систем с мозаичной структурой углового поля, в которых поля смежных оптических каналов могут перекрываться.

Ключевые слова: дискретизация пространства, мозаичное угловое поле, оптико-электронные системы.

Особенности мозаичных систем. В последние годы возрос интерес к разработкам оптических систем с мозаичным угловым полем, аналогичным фасеточному глазу некоторых насекомых. Мозаичные оптические системы состоят из многочисленных оптических каналов, каждый из которых воспринимает поток излучения в сравнительно узком угловом поле. Оптические оси каналов развернуты относительно друг друга на определенный угол и в совокупности перекрывают широкое угловое поле. В традиционных оптико-электронных системах, построенных по схеме „объектив—фокальная матрица приемника излучения“, дискретизация пространства (выборка) осуществляется в плоскости изображения, пиксели образуются элементами матрицы. В мозаичных системах выборка реализуется в пространстве объектов, именно это пространство делится на пиксели узкими угловыми полями. Такая выборка имеет существенные особенности, в частности угловые поля смежных оптических каналов могут перекрываться.

Одним из вариантов оптико-электронной системы с мозаичным угловым полем является обзорно-панорамная система с секторными объективами (рис. 1) [1]. Пространство объектов делится секторами на k равных частей, каждая из которых соответствует азимутальному углу $360^\circ/k$ градусов. Секторы образуют кольцо, что обеспечивает круговой обзор пространства. Внешняя (входная) поверхность каждого сектора является светосильной, а выходная поверхность (торец) — плоской. Изображение строится в плоскости торца, сопряженного с приемником излучения.



Рис. 1

Существуют различные варианты мозаичных оптико-электронных систем. В ряде случаев мозаичный принцип построения углового поля дополняется использованием фокальных матриц в каждом канале, создающих изображение высокого качества, удовлетворяющее, в частности, требованиям аэрокосмической съемки. В мозаичных (фасеточных) системах, когда каждый канал „работает“ на одноэлементный приемник излучения, получение высокого пространственного разрешения проблематично, однако успехи в области микрооптики обнадеживают. Так, например, учеными Калифорнийского университета Беркли разработана фасеточная система, в которой микролинзы расположены на куполообразной поверхности из эпоксидной смолы. Каждая микролинза сопряжена с оптическим волокном, подводящим поток излучения к приемнику (рис. 2) [2]. Система микролинз образует мозаичный объектив, состоящий из 8500 искусственных фасеток. Диаметр объектива — 2,5 мм.

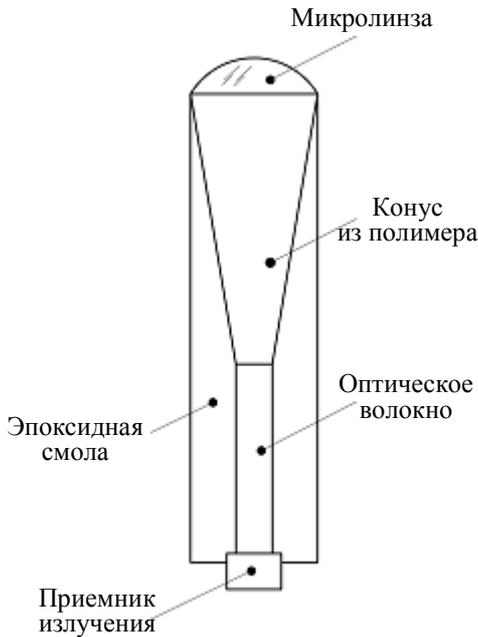


Рис. 2

Предполагается, что такие объективы (см. рис. 2) могут использоваться в системах технического зрения, охранных системах, при создании искусственной сетчатки глаза. Пространственное разрешение мозаичных систем зависит, очевидно, от числа каналов, которое ограничено прежде всего технологическими факторами.

Вместе с тем улучшить энергетическое и пространственное разрешение мозаичных систем позволяет пространственная выборка с перекрытием угловых полей оптических каналов.

Выборка в мозаичных системах. Структура мозаичного углового поля представлена на рис. 3.

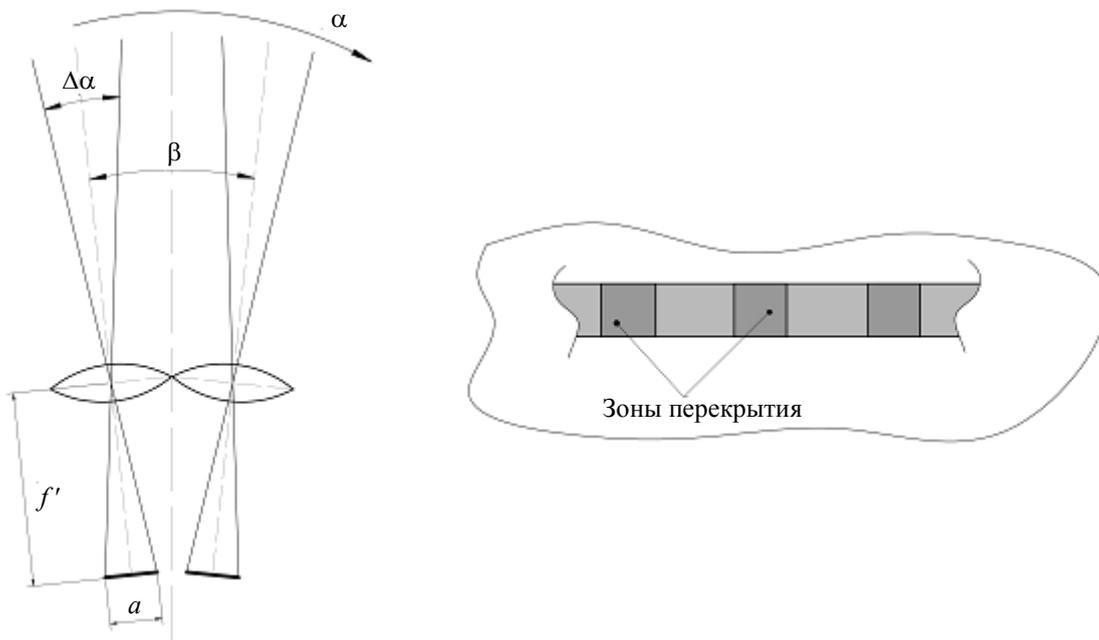


Рис. 3

Угловое поле канала (фасетки) равно $\Delta\alpha = a / f'$, рад, где a — размер полевой диафрагмы, f' — фокусное расстояние объектива.

Когда значение $\Delta\alpha$ меньше углового расстояния между каналами β (периода фасеток), образуются „мертвые зоны“ — зазоры между каналами. При выборке в пространстве изображений с помощью фокальной матрицы „мертвые зоны“ неизбежны из-за зазоров между эле-

ментами матрицы, при выборке в пространстве объектов они устраняются естественным образом, если $\Delta\alpha \geq \beta$.

Представим процедуру выборки. Допустим, что задана функция $S(\alpha)$, описывающая распределение яркости в пространстве объектов по угловому полю как функция угла α (рис. 4, а — сигналы, б — их спектры). Функция $S(\alpha)$ имеет пространственно-частотный спектр $S(f_\alpha)$, записанный как функция угловых пространственных частот f_α , рад⁻¹.

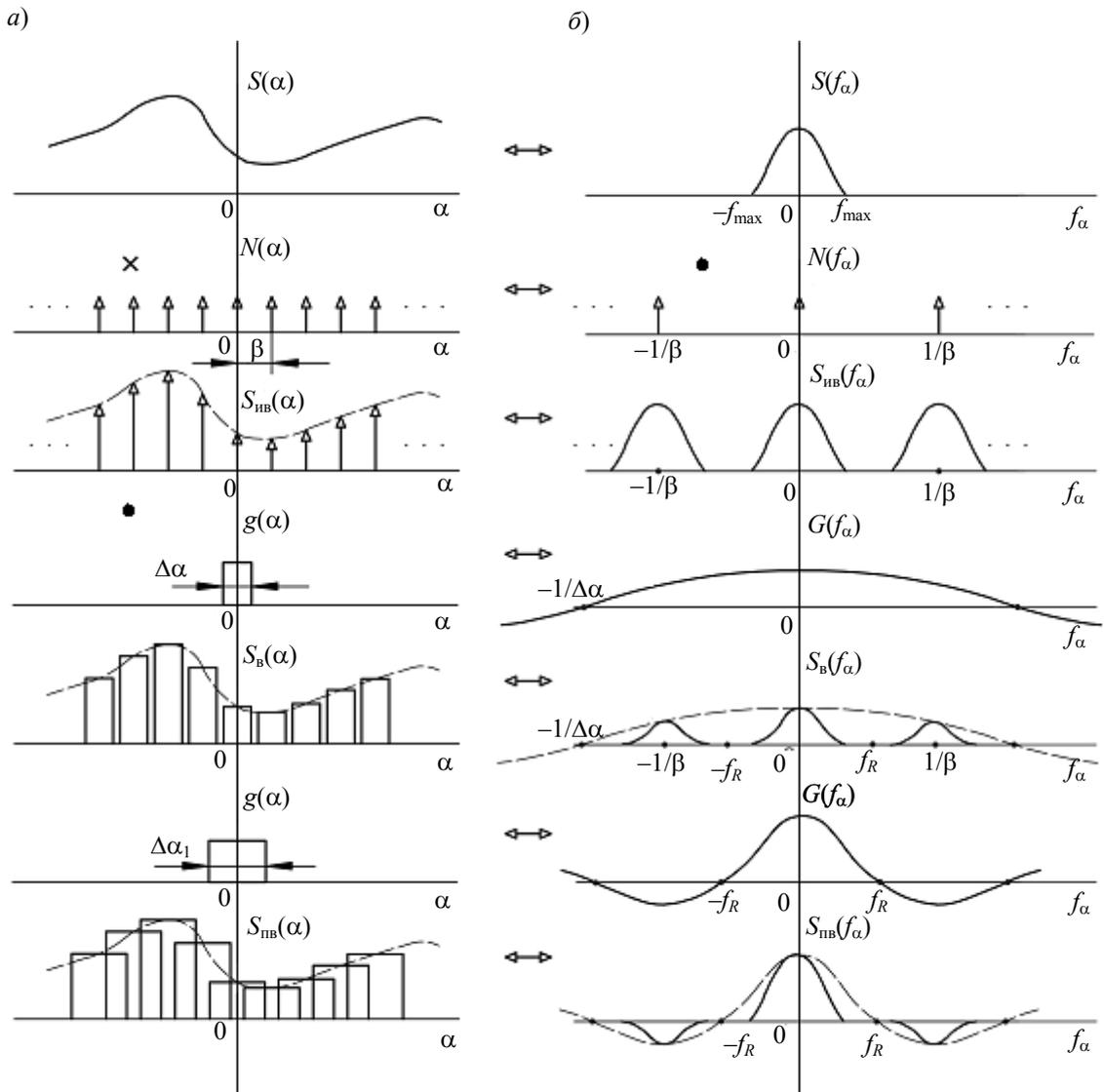


Рис. 4

Используем методику описания усредняющей выборки [3]. Идеальная выборка функции $S(\alpha)$ описывается следующим произведением:

$$S_{\text{ив}}(\alpha) = S(\alpha) \times N(\alpha), \tag{1}$$

где $N(\alpha) = \frac{1}{\beta} \text{comb}\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)$ — решетчатая функция с угловым периодом β , равным угловому расстоянию между каналами. Напомним, что решетчатая функция

$$\text{comb}\left(\frac{\alpha}{\beta}\right) = \beta \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\alpha - n\beta),$$

где $\delta(\alpha)$ — дельта-функция Дирака.

Произведению (1) соответствует свертка в частотной области, т.е.

$$F[S(\alpha) \times N(\alpha)] = S(f_\alpha) \bullet N(f_\alpha),$$

$$N(f_\alpha) = F[N(\alpha)] = F\left[\frac{1}{\beta} \text{comb}\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)\right] = \text{comb}(\beta f_\alpha) = \frac{1}{\beta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(f_\alpha - \frac{n}{\beta}\right).$$

Здесь запись $F[]$ означает операцию преобразования Фурье от функции в скобках. Функции, указанные стрелками (см. рис. 4), являются парой преобразования Фурье. На основании фильтрующего свойства дельта-функции получим

$$F[S_{\text{ив}}] = S_{\text{ив}}(f_\alpha) = \frac{1}{\beta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} S\left(f_\alpha - \frac{n}{\beta}\right).$$

Сигнал в каждом оптическом канале (фасетке) усредняется, что может быть представлено сверткой идеальной выборки с прямоугольной ($S_{\text{пв}}$) функцией $g(x)$, физический смысл которой — усредненное значение чувствительности канала по угловому полю

$$S_{\text{в}}(\alpha) = S_{\text{ив}}(\alpha) \bullet g(\alpha).$$

Тогда спектр функции $S_{\text{в}}(\alpha)$, описывающей усредняющую выборку, будет

$$F[S_{\text{в}}(\alpha)] = S_{\text{ив}}(f_\alpha) \times G(f_\alpha),$$

где

$$G(f_\alpha) = F\left[\text{rect}\left(\frac{\alpha}{\Delta\alpha}\right)\right] = \Delta\alpha \text{ sinc}(\Delta\alpha f_\alpha),$$

$$\text{sinc}(\Delta\alpha f_\alpha) = \frac{\sin(\pi\Delta\alpha f_\alpha)}{\pi\Delta\alpha f_\alpha},$$

$\text{rect}\left(\frac{\alpha}{\Delta\alpha}\right)$ — прямоугольный импульс длительностью $\Delta\alpha$, равной величине углового поля канала.

Окончательно получим, что пространственно-частотный спектр усредняющей выборки определяется как

$$S_{\text{в}}(f_\alpha) = \frac{\Delta\alpha}{\beta} \text{sinc}(\Delta\alpha f_\alpha) \sum_{n=-\infty}^{\infty} S\left(f_\alpha - \frac{n}{\beta}\right). \quad (2)$$

Проанализировав (2), а также из графических представлений (см. рис. 4) можно определить влияние углового поля на результаты выборки. Функция $F[g(\alpha)] = G(f_\alpha)$ выступает как частотная характеристика пространственного фильтра, преобразующего спектр сигнала. Для восстановления сигнала по выборке, как известно, требуется выполнение условия Котельникова, что в рассматриваемом случае выражается неравенством $\frac{1}{\beta} \geq 2f_{\text{max}}$, при выполнении которого боковые полосы в спектре выборки не перекрываются (см. рис. 4). В противном случае (при нарушении указанного условия) перекрытие полос осуществляется в области

пространственной частоты $f_R = \frac{1}{2\beta}$. Функция $G(f_\alpha)$ обращается в нуль на частоте $f_\alpha = \frac{1}{\Delta\alpha}$.

Если $f_R = \frac{1}{2\beta} = \frac{1}{\Delta\alpha}$ или $\Delta\alpha = 2\beta$, частоты спектра в области наложения боковых полос подавляются фильтром $G(f_\alpha)$. Соотношение $\Delta\alpha = 2\beta$ означает, что угловые поля каналов должны наполовину перекрываться. При заданном числе каналов расширение углового поля вдвое

дает и соответствующий энергетический выигрыш. Следствием этого является возможное искажение высокочастотной составляющей изображения за счет спада функции $\Delta\alpha \text{sinc}(\Delta\alpha f_\alpha)$.

Приведенные рассуждения относятся к одномерному случаю выборки. Двумерная выборка описывается более сложно, но вывод, касающийся результатов перекрытия угловых полей оптических каналов, остается в силе.

Отметим, что фасетки глаза насекомых имеют гексагональную структуру. Такой структуре соответствует сетчатый растр дискретизации, в котором решетки строк так же, как и в рассмотренном выше случае, сдвинуты на половину периода. Гексагональный растр при выборке обеспечивает экономию числа отсчетов по сравнению с выборкой по квадратному растру на 15 % [4].

Заключение. В отличие от широко распространенных оптико-электронных систем с фокальными матрицами, системы с мозаичным угловым полем реализуют выборку в пространстве объектов, а не в пространстве изображений. Выборка в пространстве объектов может осуществляться с перекрытием угловых полей смежных оптических каналов. Преимуществами такой выборки являются повышение качества изображения за счет подавления пространственных частот в зоне возможного наложения боковых полос в спектре выборки и увеличение потока излучения в оптических каналах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. СССР № 4689468/22. Устройство для определения азимута светоизлучающих объектов / *Соломатин В. А.* и др. 05.05.89.
2. Insect eye inspires future vision [Electronic resource]: <<http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/4946452.stm>>.
3. *Соломатин В. А.* Системы контроля и измерения с многоэлементными приемниками. М.: Машиностроение, 1992. 128 с.
4. *Ярославский Л. П.* Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. М.: Радио и связь, 1987. 296 с.

Сведения об авторе

Владимир Алексеевич Соломатин

— д-р техн. наук, профессор; Московский государственный университет геодезии и картографии, кафедра оптико-электронных приборов; E-mail: vsolomatin@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
08.06.09 г.