

СТРУКТУРА УГЛОВОГО ПОЛЯ ФАСЕТОЧНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Во избежание энергетических потерь и пропусков обозреваемого пространства угловые поля смежных оптических каналов должны перекрываться. Предложены способы формирования оптимального перекрытия для информационных систем и систем обнаружения. Статья будет интересна разработчикам систем технического зрения.

В оптико-электронных системах (ОЭС), построенных по принципу фасеточного глаза, возможна реализация выборки поля яркости объектов с перекрытием отсчетов. Такая процедура дает принципиально новые возможности пространственной фильтрации сигнала в оптико-электронных системах. Для реализации выборки с перекрытием угловое поле оптической системы должно иметь определенную структуру. В статье обсуждаются преимущества выборки с перекрытием и вопросы формирования соответствующей структуры углового поля оптической системы.

Интерес разработчиков к ОЭС с фасеточным угловым полем [1], в которых реализуется принцип фасеточного зрения насекомых, вызван разными причинами. Когда глаз состоит из множества объективов, каждый из которых строит изображение определенной части пространства предметов, а направления оптических осей объективов различны, то он может охватывать огромное угловое поле, вплоть до сферы. Высокое быстродействие, стереоскопичность, большая глубина изображаемого пространства и миниатюрность – это достоинства фасеточного зрения. Однако фасеточному глазу свойственно низкое пространственное разрешение, которое следует из принципа пространственной дискретизации в пространстве объектов, при котором пространство делится на пиксели фасетками со сравнительно короткофокусными объективами [2].

Достоинства фасеточного зрения, и в первую очередь сверхширокоугольность, привлекают к себе внимание разработчиков панорамных оптико-электронных сис-

тем кругового обзора. Эти системы могут использоваться для контроля полостей, в охранных системах, для видеонаблюдения, фотосъемки, в робототехнике, системах ориентации летательных аппаратов, в системах военного назначения (поиск и обнаружение целей, распознавание угроз, слежение).

Проблема повышения пространственного разрешения фасеточных систем в настоящее время решается двумя путями. Первое направление предполагает использовать микролинзы, сопряженные оптическим волокном с соответствующим элементом матрицы приемников излучения. Такие устройства могут содержать тысячи фасеток. Известны применения микролинзовых фасеточных систем в мобиль-

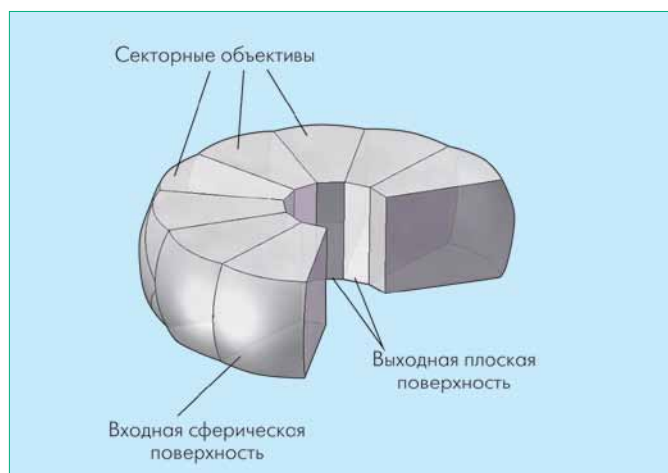


Рис.1 Обзорно-панорамная фасеточная система с кольцом секторных объективов

ных фотокамерах и видеосистемах для получения объемного изображения [1]. Второе направление предполагает применение обычных линзовых (макрооптических) систем. Объектив каждого канала (фасетки) может быть сопряжен либо с одноэлементным приемником излучения, либо с матрицей приемников в зависимости от назначения системы и требуемого пространственного разрешения.

Наиболее простыми с точки зрения технической реализации являются фасеточные ОЭС, построенные по схеме «макролинзовый объектив – одноэлементный приемник излучения». Благодаря простоте, надежности, технологичности,

возможности применения высокочувствительных одноэлементных приемников излучения такие системы могут использоваться, в частности, для обнаружения и измерения азимутального угла импульсных целей, например факелов ракет, когда достаточно определить азимутальный угол с погрешностью 3–5 градусов. Размещение по окружности соответствующего числа макрообъективов (порядка сотни) создает определенные конструкторские проблемы, которые нам удалось решить путем создания интегрированной конструкции фасеточной обзорно-панорамной системы (рис.1) [3]. Ее схема содержит n объективов, боковые поверхности создают

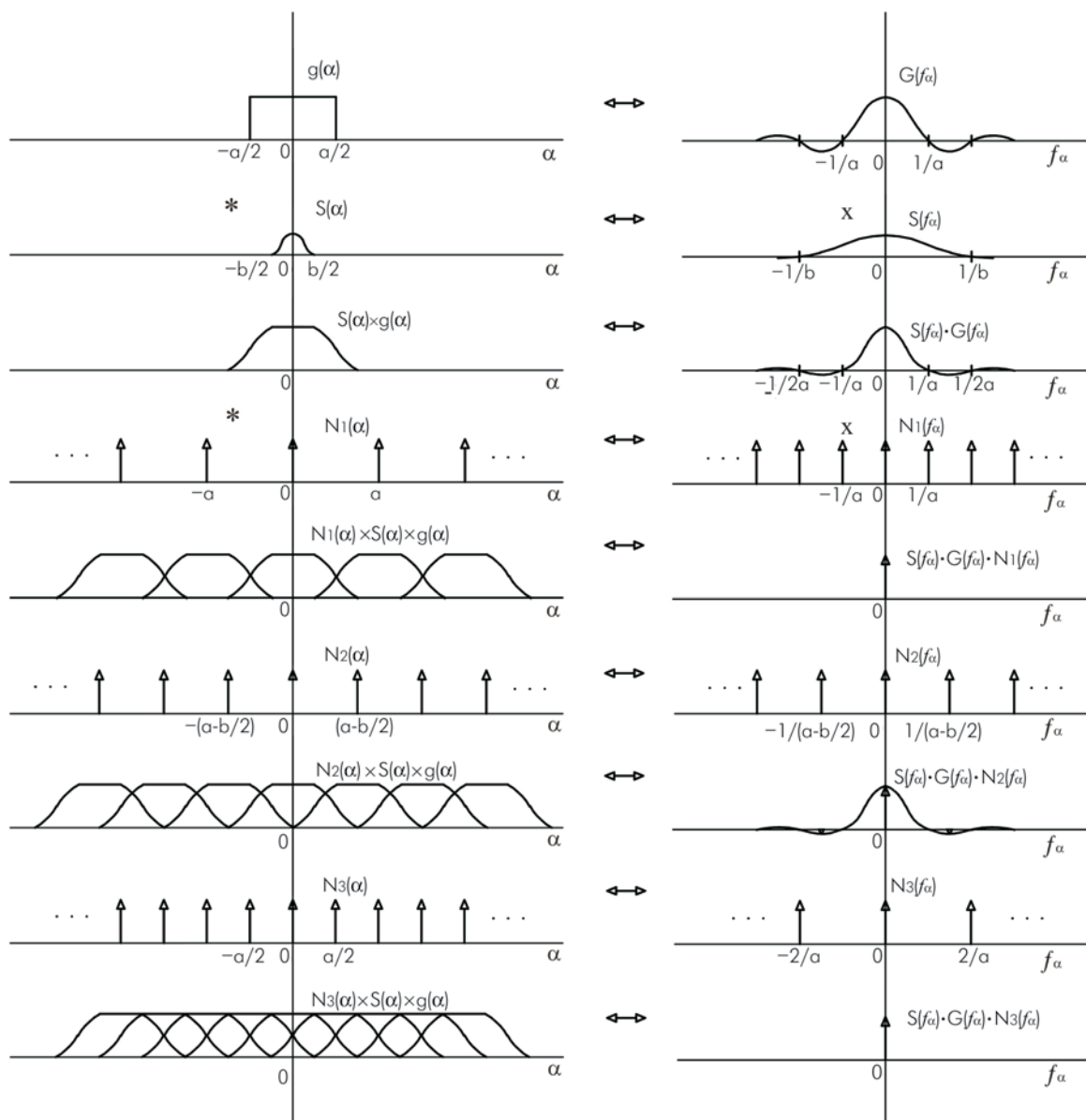


Рис.2 Сигналы и их спектры в фасеточной системе обнаружения точечных объектов

сектора, образующие в совокупности кольцо. Внешняя (входная) поверхность каждого секторного объектива является светосильной, а выходная поверхность, сопряженная с приемником излучения, плоская. Угловое поле такой фасеточной системы состоит из n узких угловых полей оптических каналов. Во избежание энергетических потерь и пропусков обозначаемого пространства угловые поля смежных оптических каналов должны перекрываться. Какое же перекрытие является оптимальным? Одинаково ли оно для систем обнаружения и для информационных систем, создающих изображение пространства? Как увеличить входной зрачок фасеток? Обсудим эти вопросы.

СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ

Будем считать, что чувствительность системы в угловом поле каждого канала постоянна, то есть описывается прямоугольной функцией $g(\alpha)$ (рис.2), и одинакова для всех полей. Импульсная характеристика секторного объектива (функция рассеяния точки) задана как $s(\alpha)$. Отметим, что функции $g(\alpha)$ и $s(\alpha)$ записаны в зависимости от азимутального угла α , но могут быть приведены и к плоскости изображения. В последнем случае a – размер диафрагмы поля, b – размер кружка рассеяния. Величина потока излучения, попадающего в угловое поле как функция текущего угла α , описывается сверткой $s(\alpha)*g(\alpha)$. Отметим, что возрастание и спад свертки (бедря функции $s(\alpha)*g(\alpha)$) в изопланарной оптической системе представляются краевой функцией, описывающей распределение потока излучения в изображении оптической полуплоскости (пространственный аналог переходной характеристики). При чередовании угловых полей с периодом T_α совокупное угловое поле оптической системы описывается сверткой $s(\alpha)*g(\alpha)$ с решетчатой функцией $N_1(\alpha)$, обладающей периодом T_α . В случае, когда угловые поля фасеток соприкасаются, $T_\alpha=a$. На рис.2 показаны функции $s(\alpha)$, $g(\alpha)$, $s(\alpha)*g(\alpha)$, $s(\alpha)*g(\alpha)*N_1(\alpha)$ и соответствующие им спектры.

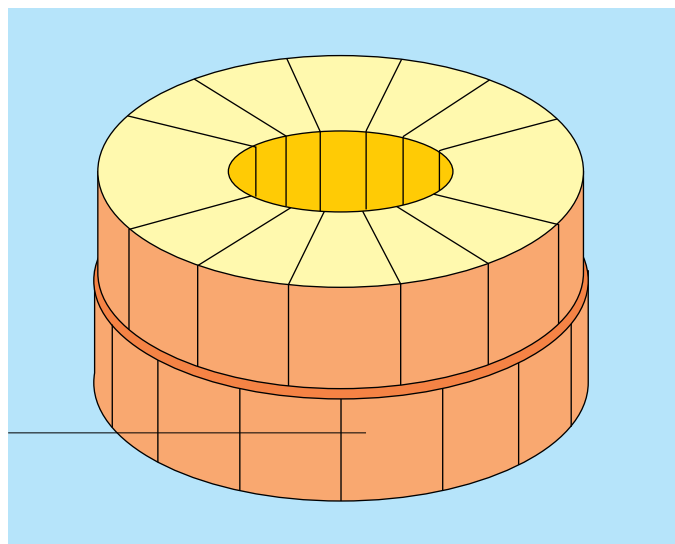


Рис.3 Фасеточная система из двух колец секторных объективов

Воспользуемся сокращенной формой записи функций, принятой в Фурье-анализе:

$$g(\alpha)=\text{rect}[a/a],$$

$$G(f_\alpha)=F[g(\alpha)]=F\text{rect}[a/a]=a \text{ sinc}(af_\alpha),$$

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

$$N(\alpha)=\frac{1}{T_\alpha} \text{comb}\left(\frac{\alpha}{T_\alpha}\right),$$

$$F[N(\alpha)]=F\left[\frac{1}{T_\alpha} \text{comb}\left(\frac{\alpha}{T_\alpha}\right)\right]=\text{comb}(T_\alpha f_\alpha),$$

$$\text{comb}(T_\alpha f_\alpha)=\frac{1}{T_\alpha} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(f_\alpha - \frac{k}{T_\alpha}\right),$$

где $\text{rect}[a/a]$ – функция, описывающая прямоугольный импульс единичной амплитуды длительностью a ; $\delta()$ – дельта-функция Дирака от аргумента в скобках, а запись $F[]$ означает операцию нахождения Фурье-образа от аргумента в скобках.

Когда $T_\alpha=a$, при переходе изображения из одного канала в соседний канал возможна потеря половины потока. Но при этом модуляции потока за счет движения изображения по полю не происходит. Действительно, спектр функции, описывающей сигнал при движении точечной цели по угловому полю, описывается произведением

$$G(f_\alpha) \cdot S(f_\alpha) \cdot N(f_\alpha).$$

При $T_\alpha=a$ Фурье-образ

$$F[N_1(\alpha)] = \text{comb}(af_\alpha) = \frac{1}{a} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(f_\alpha - \frac{k}{a}\right).$$

Решетчатая функция $\text{comb}(af_\alpha)$, имеющая период $1/a$, попадает в нули функции $G(f_\alpha)$ и соответственно в нули произведения $G(f_\alpha) \cdot S(f_\alpha)$. Это означает, что в спектре произведения $G(f_\alpha) \cdot S(f_\alpha) \cdot (f_\alpha)$ будет содержаться только постоянная составляющая. При перекрытии угловых полей, когда $T_\alpha < a$, потери потока на границах каналов уменьшаются и зависят от величины перекрытия и распределения потока в кружке рассеяния (соответственно от краевой функции). Величина потерь определяется значением свертки $s(\alpha)*g(\alpha)$ в точке смещения, соответствующей середине зоны перекрытия. Так, при перекрытии угловых полей на половину кружка рассеяния, когда $T_\alpha=(a-b)/2$, потери потока могут достигать 15–20%.

При перекрытии угловых полей на угловой размер кружка рассеяния, когда $T_\alpha=(a-b)$, потерь потока можно избежать, поскольку при любом азимутальном угле точечный объект полностью находится в угловом поле одного из каналов. Вопрос о том, как определить, в каком именно канале находится объект при попадании в смежную зону каналов, здесь не обсуждается. Он может быть решен, например, методом временной селекции по скорости нарастания сигнала.

Интересен случай, когда угловое перекрытие каналов равно половине углового поля, то есть при $T_\alpha = a/2$. Точечный объект в этом случае при любом угле α будет захватывать

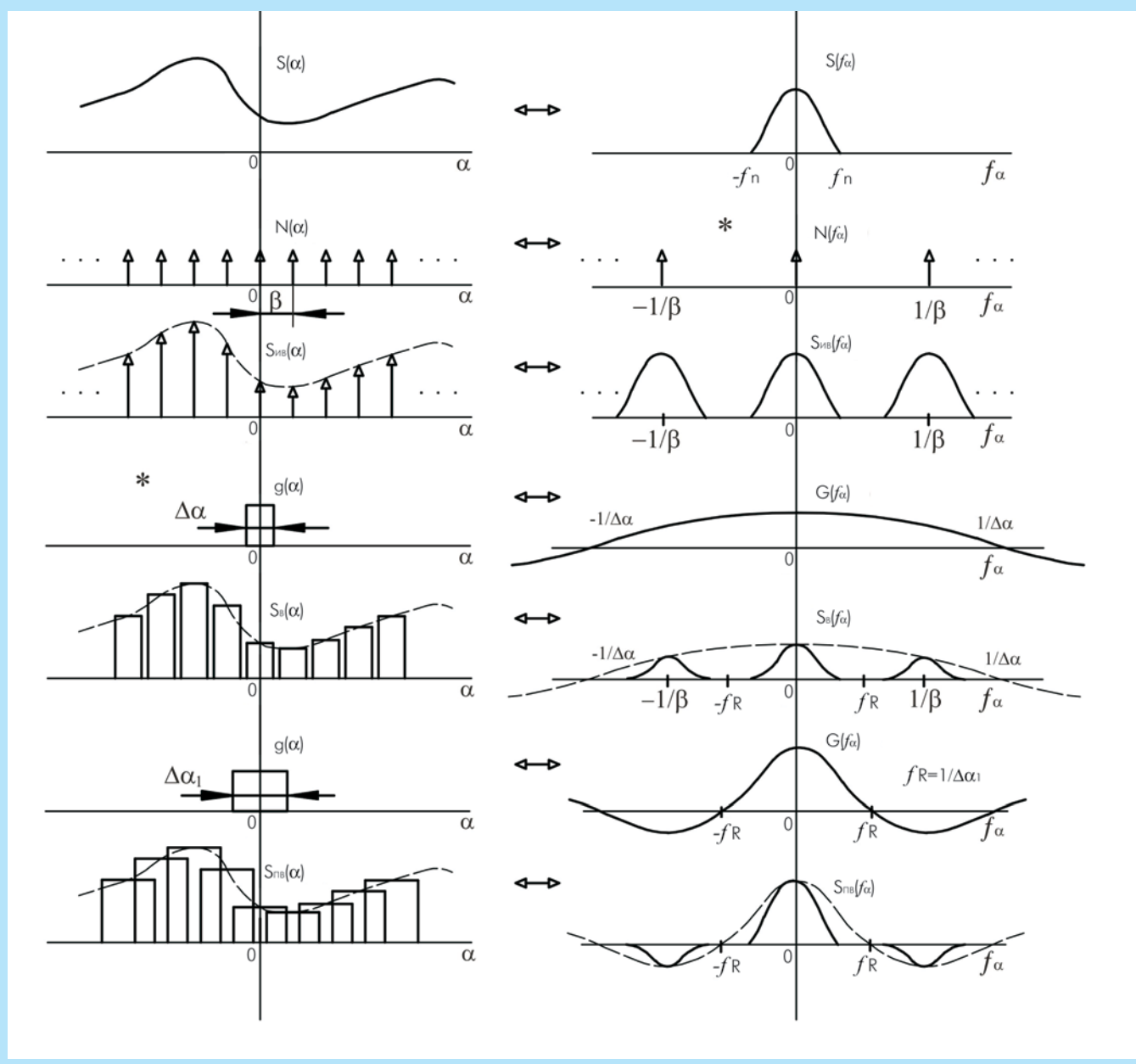


Рис. 4 Сигналы и их спектры в информационной фасеточной системе

ся двумя смежными каналами. При попадании в зону границы 1-го и 3-го каналов объект находится полностью во 2-м канале и частично в 1-м и 3-м каналах. Как и в случае расположения угловых полей без перекрытия, спектр произведения $G(f_\alpha) \cdot S(f_\alpha) \cdot (f_\alpha)$ содержит только постоянную составляющую. К варианту перекрытия смежных угловых полей на половину поля мы еще вернемся при рассмотрении информационных фасеточных систем. Различные варианты перекрытия угловых полей смежных каналов в системах обнаружения приведены в таблице.

Наличие только постоянной составляющей в спектре $G(f_\alpha) \cdot S(f_\alpha) \cdot N_1(f_\alpha)$ и в спектре $G(f_\alpha) \cdot S(f_\alpha) \cdot N_3(f_\alpha)$ означает, что при перемещении точечного объекта по угловому полю системы суммарный сигнал от всех элементов не модулируется. Это важное обстоятельство приводит к идее суммирования сигналов смежных каналов для увеличения пото-

ка излучения, поступающего в систему от точечного объекта. В случае без перекрытия угловых полей суммы (s_1+s_2) , (s_2+s_3) , \dots , (s_n+s_1) содержат полный поток от точечного объекта, а в случае с перекрытием на половину углового поля суммы $(s_1+s_2+s_3)$, $(s_2+s_3+s_4)$, \dots , $(s_n+s_1+s_2)$ содержат удвоенный поток от цели, где s_1, s_2, \dots, s_n – сигналы в соответствующих каналах. Отметим, что вычисление сумм смежных отсчетов сигнала реализуется при медианной фильтрации, перейти к которой помогает процедура вычисления среднего значения серии отсчетов.

Вариант возможной технической реализации перекрытия угловых полей оптических каналов – введение второго кольца секторных объективов, развернутого по азимуту по отношению к первому кольцу на угол перекрытия (рис.3). Очевидно, что входной зрачок при введении дополнительного кольца объективов увеличивается вдвое и при этом не исключается

использование суммирования сигналов смежных каналов.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

В фасеточных макролинзовых информационных системах, предназначенных для получения изображения, при использовании одноэлементных приемников излучения практически невозможно достигнуть пространственного разрешения лучше, чем 1–2 градусов из-за очевидной громоздкости такой системы. Но конструкции с числом фасеток по окружности порядка 120 вполне жизнеспособны, а в ряде случаев, например в системах обнаружения движения, в охранных системах информационного типа пространственное разрешение в единицы градусов вполне допустимо. При использовании микрооптических систем, в которых фасетки построены по схеме «микрообъектив – одноэлементный приемник излучения», как показали исследования, проведенные в Калифорнийском университете [4], возможно получение разрешения, сопоставимого с разрешением глаза человека.

Как в макрооптических, так и в микрооптических информационных системах при сканировании возникает проблема редукции пространственных частот, суть которой состоит в искажении пространственного спектра исходного сигнала из-за наложения соседних боковых полос в спектре полученного сканированием сигнала (изображения). Редукция отсутствует при выполнении известного условия теоремы Котельникова, устанавливающей требуемый интервал выборки (интервал Найквиста). При ограниченном числе фасеток это условие может не выполняться. Задача оптимизации структуры углового поля фасеточной системы в этом случае может быть сформулирована как условие минимизации последствий редукции пространственных частот.

Рассмотрим случай произвольного распределения яркости в пространстве объектов по угловому полю, представленного функцией $s(\alpha)$ (рис.4). Используем методику описания усредняющей выборки [3]. Идеальная выборка функции $s(\alpha)$ описывается произведением

$$S_{\text{ив}}(\alpha) = s(\alpha) \cdot N(\alpha), \text{ где}$$

$$N(\alpha) = \frac{1}{\beta} \text{comb}\left(\frac{\alpha}{\beta}\right),$$

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

Произведению $s(\alpha) \cdot N(\alpha)$ соответствует в частотной области свертка

$$F[s(\alpha) \cdot N(\alpha)] = S(f_{\alpha}) \cdot N(f_{\alpha}),$$

$$\text{где } N(f_{\alpha}) = \text{comb}(\beta f_{\alpha}) = (1/\beta) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} S(f_{\alpha} - n/\beta).$$

Сигнал в каждом оптическом канале (фасетке) усредняется, что может быть представлено сверткой идеальной выборки с прямоугольной функцией $g(\alpha)$, физический смысл которой – усредненное значение чувствительности канала по угловому полю

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

Тогда спектр функции $g(\alpha)$, описывающей усредняющую выборку, будет

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

$$\text{где } G(f_{\alpha}) = F[\text{rect}(\alpha/\Delta\alpha)] = \Delta\alpha \text{sinc}(\Delta\alpha f_{\alpha}),$$

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

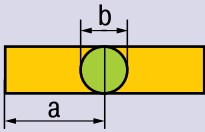
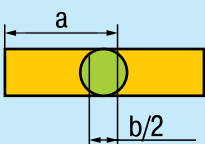
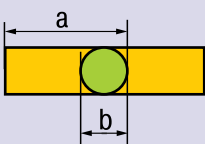
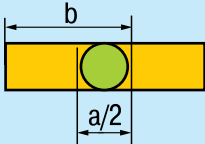
$\text{rect}(\alpha/\Delta\alpha)$ – прямоугольный импульс длительностью $\Delta\alpha$, равной ширине углового поля фасетки. Окончательно получим, что пространственно-частотный спектр усредняющей выборки определяется как

$$S_{\text{в}}(f_{\alpha}) = (\Delta\alpha/\beta) \text{sinc}(\Delta\alpha f_{\alpha}) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} S(f_{\alpha} - n/\beta).$$

Анализ выражения для $S_{\text{в}}(f_{\alpha})$ и графические представления (рис.4) позволяют определить влияние структуры углового поля на формирование информационного сигнала при сканировании фасеток. Функция $G(f_{\alpha})$ выступает как частотная характеристика пространственного фильтра, преобразующего пространственный спектр исходного сигнала. Для восстановления сигнала по выборке требуется, чтобы $1/\beta \geq 2f_m$, где f_m – максимальная частота в спектре $S(f_{\alpha})$.

Возможное перекрытие полос (редукция) будет в области пространственной частоты $f_R = 1/2\beta$. Функция $G(f_{\alpha})$ обра-

Варианты перекрытия угловых полей в фасеточных системах

Вариант	Перекрытие угловых полей	Структура углового поля	Максимальные потери потока	Дополнительное угловое поле
1	0		50%	0
2	b/2		(15-20)%	b-n/2
3	b		0%	b-n
4	a/2		0%	a-n/2

ется в ноль на частоте $f_R=1/\Delta\alpha$. Если $f_R=1/2\beta=1/\Delta\alpha$, или при $\Delta\alpha=2\beta$ частоты спектра в области редукции подавляются фильтром $G(f_\alpha)$. Соотношение $\Delta\alpha=2\beta$ означает, что угловые поля смежных каналов должны перекрываться наполовину.

В традиционных ОЭС, построенных по схеме «объектив – фокальная матрица приемников излучения», дискретизация пространства (выборка) осуществляется в плоскости изображения, пиксели образуются элементами матрицы. В фасеточных системах выборка реализуется в пространстве объектов, именно это пространство делится на пиксели узкими угловыми полями фасеток. Такая выборка имеет важные особенности, вытекающие из возможности перекрытия угловых полей смежных каналов. Выборка с перекрытием не имеет прямых аналогов при преобразованиях временных (радиотехнических) сигналов, хотя принципиально возможна и во временной области при условии включения функции памяти отсчетов (выборок) и их задержки во времени. В фасеточных системах выборка с перекрытием отсчетов реализуется сравнительно просто путем пространственного наложения угловых полей смежных оптических каналов (фасеток).

В фасеточных системах, предназначенных для обнаружения точечных объектов, оптимальным с точки зрения уменьшения потерь полезного сигнала является перекрытие угло-

вых полей на угловой размер кружка рассеяния. Перекрытие угловых полей таких систем на половину углового поля при реализации суммирования сигналов трех смежных каналов позволяет вдвое увеличить площадь входного зрачка. Другим путем увеличения площади входного зрачка является использование дополнительного кольца секторных объективов, что не исключает использование суммирования сигналов. В информационных фасеточных системах, предназначенных для получения изображения, оптимальным с точки зрения пространственного разрешения является перекрытие угловых полей на половину углового поля. Такое перекрытие дает и энергетический выигрыш за счет накопления полезного сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Соломатин В.А.** Фасеточное зрение: перспективы в оптико-электронных системах. – Фотоника, 2009, № 1.
2. Устройство для определения азимута светоизлучающих объектов. Авт. св. СССР № 4689468/22 от 05.05.89/ Соломатин В.А. и др.
3. **Соломатин В.А.** Системы контроля и измерения с многоэлементными приемниками. – М.: Машиностроение, 1992.
4. Insect eye inspires future vision. <http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/4946452.stm>.