

И. И. СУХАНОВ, С. В. ЯКУШКИН

(Новосибирск)

ОПТИМИЗАЦИЯ СИГНАЛА ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЧЕТЫРЕХКВАДРАНТНОГО ФОТОПРИЕМНИКА

Для измерения пространственных координат светового пучка используются позиционно-чувствительные фотоприемники, в частности четырехквadrантные фотодиоды (КФД) [1]. Простейшей схемой обработки сигнала КФД является дифференциальное включение его сегментов, симметричных относительно его центра (рис. 1). При малом смещении центра светового пятна относительно центра КФД сигнал пропорционален этому смещению, поэтому показатель чувствительности КФД к линейному смещению — дифференциальная крутизна сигнала.

В данной работе исследован вопрос о зависимости крутизны сигнала от геометрических размеров КФД для светового пучка с гауссовым распределением интенсивности в поперечном сечении, характерным для излучения, генерируемого лазерами. Выяснено, при каком диаметре пучка в плоскости КФД чувствительность максимальна для КФД с данными размерами, или наоборот, какой фотодиод необходимо подобрать для пучка данного диаметра.

Пусть на КФД с размером сегмента a и расстоянием между сегментами $2b$ падает пучок с гауссовым распределением интенсивности в поперечном сечении:

$$I(x, y) = (2/\pi w^2) \exp[-2(x - x_0)^2/w^2 - 2(y - y_0)^2/w^2];$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) dx dy = 1. \quad (1)$$

Здесь w — радиус пучка по уровню амплитуды поля $1/e$ от максимума; x_0, y_0 — смещение центра гауссова пучка вдоль соответствующих координатных осей относительно центра КФД, принятого за начало координат. Для лазерных пучков w определяется геометрией резонатора и внешней оптической системой, преобразующей пучок. Расчет параметра w производится по формулам гауссовых пучков (см., например, [2]).

Дифференциальный сигнал U_{13} между сегментами 1 и 3 пропорционален разности интегралов интенсивности (1) по площадям этих сегментов. Крутизна сигнала по x -координате при несмещенном пучке равна

$$S_x = (\partial U_{13}/\partial x_0)|_{x_0=0, y_0=0}. \quad (2)$$

Производя преобразование координат $x, y \rightarrow x', y'$ для каждого сегмента (см. рис. 1), получаем окончательную формулу крутизны сигнала через интегралы вероятности:

$$S_x = \sqrt{\frac{2}{\pi}} (F(\alpha + \beta) - F(\beta)) (e^{-\beta^2} - e^{-(\alpha+\beta)^2});$$

$$\alpha = \sqrt{2} a/w; \quad \beta = \sqrt{2} b/w; \quad (3)$$

$$F(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt.$$

Величины a, b выражены в единицах w .

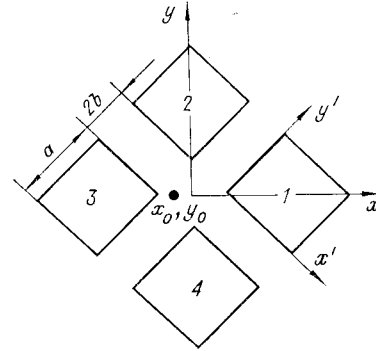


Рис. 1.

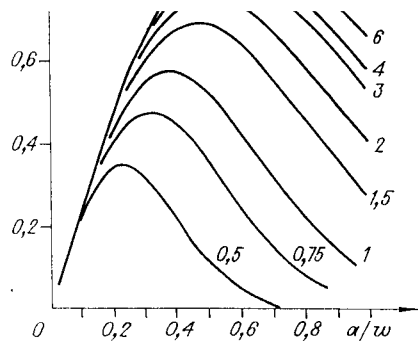


Рис. 2

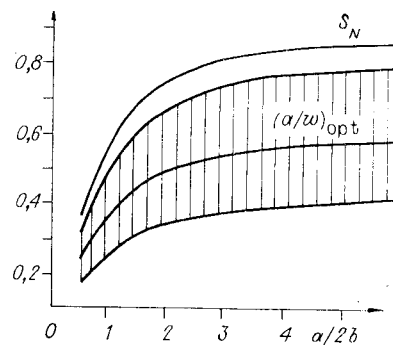


Рис. 3

Предположим, что зазор между сегментами отсутствует, т. е. $2b = 0$. Тогда $\beta = F(\beta) = 0$. В этом случае от размера сегмента a крутизна зависит следующим образом: при $a \rightarrow 0$ $S \sim a^3$, а при $a \rightarrow \infty$ $F(\alpha) \rightarrow 1$ и S стремится к предельному значению $\sqrt{2/\pi} \approx 0,8$. Однако увеличивать размеры сегментов выше некоторого предела нецелесообразно, поскольку это приведет к росту темнового тока I_T фотодиода и соответственно к уменьшению отношения сигнала к шуму. При малых смещениях пучка отношение сигнала к шуму S_N , пропорциональное S/I_T , определяет пространственное разрешение КФД и поэтому именно его целесообразно оптимизировать.

Будем рассматривать модель линейной зависимости I_T от площади фоточувствительного слоя, т. е. $I_T \sim a^2$. На рис. 2 изображена зависимость $S_N = S_N/(a/w)^2$ от относительного размера сегмента a/w при различных значениях $a/2b$. При $a/2b \geq 6$ все графики $S_N(a/w)$ сливаются. Максимальному отношению сигнала к шуму соответствует $a/w \sim 0,2-0,6$ при $a/2b > 0,5$, причем уже при $a/2b \approx 2,5$ S_N достигает 90%-ного максимального значения. Поэтому изготавливать фотодиод с сегментами большой площади и узкими зазорами, т. е. при $a/2b > 3$, нет необходимости, тем более, что это может быть сопряжено с технологическими трудностями.

На рис. 3 представлена зависимость оптимального отношения $(a/w)_{opt}$ от $a/2b$, построенная по экстремумам графиков рис. 2. Заштрихована область, в которой S_N уменьшается не более чем на 10% от максимума для данного значения $a/2b$. Приведена также зависимость $S_{N \max}$ от параметров фотодиода. По этим графикам можно найти оптимальные параметры КФД или пучка. Если имеется КФД с определенными размерами a и $2b$, то по отношению $a/2b$ находим соответствующее значение $(a/w)_{opt}$, а отсюда и w_{opt} . Наоборот, если зафиксирован радиус пучка w и имеется набор фотодиодов, то, вычисляя a/w для разных КФД, отбираем те значения, которые попадают в область $(a/w)_{opt}$. Затем из них выбираем те, которым соответствует максимальное отношение $a/2b$.

Рассмотрим пример выбора размеров пучка для данного КФД. Пусть $a/2b = 2,5$, тогда по графикам рис. 3 находим $(a/w)_{opt} \approx 0,53$. Следовательно, при симметричном положении светового пятна относительно КФД расстояние от центра до внешних концов зазоров КФД, т. е. до сторон квадрата, образованного четырьмя сегментами, равно 0,64. Интенсивность пучка на таком расстоянии уменьшается на 33%. В экспериментальной практике принято считать оптимальным случай, когда видимое световое пятно полностью уместается в границах КФД. Для He-Ne-лазера видимый радиус пучка с точностью 10% соответствует 2%-ному уровню от интенсивности на оси и равен $1,4w$ [3]. Для $a/w = 1,4$ и $a/2b = 2,5$ крутизна $S_N \approx 0,2$, что в 4 раза меньше, чем при оптимальных ус-

ловиях. Расчеты, как видим, показывают, что максимальное пространственное разрешение достигается в том случае, когда размеры пучка больше размеров фотодиода.

Авторы благодарят Ю. В. Троицкого за полезное обсуждение работы.

ЛИТЕРАТУРА

УДК 535.42

Г. А. АКИМОВА, Ю. П. СЫРЫХ, А. В. ФРОЛОВ

(Калининград Московской)

О ВОССТАНОВЛЕНИИ ДВУМЕРНОГО ОБЪЕКТА ПО МОДУЛЮ ЕГО ФУРЬЕ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В последнее время возрос интерес к задаче восстановления величины поля по модулю его фурье-спектра. Такая задача возникает, в частности, при восстановлении изображений по дифракционной картине при обработке оптических сигналов и полей.

Для практических целей наибольший интерес представляет двумерный случай. Для решения задачи при этом используются итерационные алгоритмы [1], в которых число необходимых для достаточного восстановления итераций существенно зависит от выбора начального приближения, в частности от того, насколько точно оно охватывает границы объекта. В данной работе предлагается использовать для получения начального приближения аналитические свойства сигнала.

Проблема состоит в восстановлении распределения поля на объекте $f(x, y)$ по модулю его фурье-образа $A(u, v) = |F(u, v)|$,

$$\text{где} \quad F(u, v) = \mathcal{F}\{f(x, y)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-i(ux + vy)] dx dy.$$

При этом априори предполагается в силу конечных размеров объекта, что $f(x, y)$ отлична от нуля в ограниченной области пространства XU и, кроме того, принимает только действительные неотрицательные значения. Как показывают результаты исследований [2, 3], эта задача имеет однозначное решение для достаточно широкого класса $f(x, y)$. Под однозначностью здесь принято считать восстановление с точностью до линейного сдвига и инверсии.

Обычно выбор начального приближения осуществляется по результатам оценки автокорреляционного образа объекта

$$R(x, y) = f(x, y) \otimes f(-x, -y) = \mathcal{F}^{-1}\{A(u, v)^2\}.$$

Однако в двумерном случае носитель объекта не может быть определен однозначно по носителю функции $R(x, y)$ [1]. Поэтому если для формирования начального приближения использовать уменьшенный вдвое носитель автокорреляции объекта, то возможно «обрезание» части изображения объекта. Практически начальное приближение $f^0(x, y)$ формируется следующим образом: