

# ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 681.325.3

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ АВТОКОЛЛИМАТОР – АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОБЪЕКТА

© 2008 г. Ю. М. Голубовский, канд. техн. наук; В. Ф. Захаренков, канд. техн. наук;  
Д. В. Иванов; В. Н. Писарев

НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

Изложены результаты исследований фотоэлектрического автоколлиматора с приемником на основе ПЗС-линейки и ЭВМ в качестве спектроанализатора. Пороговая чувствительность прибора к перемещению изображения зависит от отношения сигнала к шуму и при отношении, равном 250, составляет 0,134 мкм, что соответствует пороговой чувствительности к повороту испытуемого зеркала не более 0,007". Прибор позволяет определять спектр мощности флюктуаций скорости поворота вращающихся зеркал, а также спектр флюктуаций излучения удаленных источников.

Коды OCIS: 120.3930, 120.7250, 230.2090.

Поступила в редакцию 18.06.2008.

Автоколлиматоры находят широкое применение в машино- и приборостроении, в военной технике, при проведении метрологических работ. Они используются также как универсальные контрольно-юстировочные устройства в оптическом приборостроении. Появление многоэлементных приемников излучения с высоким быстродействием позволяет создавать простые и надежные приборы, которые могут в том числе регистрировать быстропротекающие процессы.

В оптических устройствах в качестве сканирующего элемента часто используется зеркало, позволяющее при его развороте просматривать (обозревать) некоторое поле [1]. При этом необходимо обеспечивать либо постоянство скорости поворота зеркала, либо ее соответствие заданному закону изменения во времени. Неизбежные дефекты изготовления механических узлов, с помощью которых выполняется разворот зеркала, например, биение осей в подшипниках, а также возможные вибрации всего устройства вследствие недостаточной жесткости или наличия резонансов приводят к нестабильности скорости вращения зеркала и возникновению несанкционированных колебаний элементарного поля зрения в процессе сканирования. Для оценки влияния этих эффектов необходимо знать величину отклонения скорости от заданного закона, в более общем случае – спектр флюктуаций скорости разворота зеркала.

Описываемый автоколлиматор решает эту задачу. Кроме того, он позволяет определять спектр виб-

раций объекта, если с этим объектом связано зеркало, или частотный спектр вспышек удаленных источников излучения.

Схема автоколлиматора показана на рис. 1.

Нить лампы накаливания 1 проецируется конденсором 2 в плоскость, находящуюся за объективом 3, приблизительно там, где располагается зеркало 4, характеристики вращения которого исследуются. Фокусное расстояние объектива равно 2 м. Для сокращения габаритов прибора использованы два плоских зеркала 5 и 6. Объектив линзовый со световым диаметром 61 мм и входным зрачком диаметром 50 мм. Объектив рассчитывался таким образом, чтобы его входной зрачок располагался перед объек-

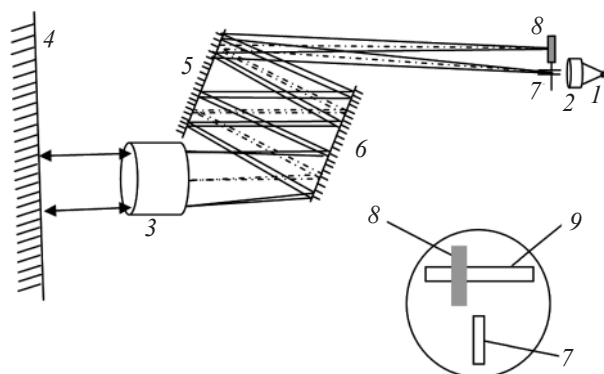


Рис. 1. Схема автоколлиматора. (Пояснения см. в тексте.)

тивом на расстоянии 0,4 м. Благодаря этому, если расстояние между объективом и зеркалом не превышает 0,4 м, то виньетирование отраженного от зеркала пучка отсутствует.

В фокальной плоскости объектива расположена диафрагма 7 со щелевидным отверстием, освещаемая лампой накаливания через конденсор. Автоколлимационное изображение щели 8 попадает на фоточувствительную поверхность ПЗС-линейки 9. Вид фокальной плоскости со стороны объектива также показан на рис. 1.

Конструкция автоколлиматора предусматривает возможность проведения измерений при разворотах зеркала вокруг двух взаимно перпендикулярных осей за счет поворота на  $90^\circ$  всего осветительно-приемного узла.

Период расположения чувствительных элементов (пикселей) линейки равен 13 мкм, длина элементов в поперечном направлении составляет 50 мкм.

При выбранном фокусном расстоянии угловой размер пиксела соответствует повороту испытуемого зеркала на  $0,67''$ . Полная длина фоточувствительной поверхности равна 26,6 мм (2048 пикселей), что позволяет исследовать повороты зеркала в пределах  $22,8'$ . При ширине щели в осветителе 0,2 мм полный размер изображения щели в плоскости линейки составляет 0,28 мм (около 22 пикселей). Кругжок рассеяния на любом участке поля практически не отличается от дифракционного в области спектра  $0,6-0,9$  мкм.

Сигналы с ПЗС-линейки поступают на блок обработки, включающий 12-разрядный АЦП и устройство сопряжения с ЭВМ. Шаг квантования выбран таким образом, чтобы на сигнал, равный среднеквадратическому значению шума, приходилось 3 кванта.

Программой предусмотрена буферизация в одном файле по 10 000 строк опросов линейки. После того как линейка будет опрошена 10 000 раз, опрос останавливается и на запуск повторного опроса оператор должен подать команду. Изображения блоками по 500 строк визуализируются на мониторе ЭВМ.

Время считывания всей линейки – величина постоянная, равная 220 мкс. Время накопления зарядов выбирается оператором из ряда 10 мкс – 10 мс с шагом 10 мкс. Таким образом, временная частота дискретизации зависит от времени накопления и, например, при времени накопления 30 мкс равна 4 кГц, при времени накопления 180 мкс – 2,5 кГц, при 10 мс – 98 Гц.

После того как количество опрошенных строк достигнет 10 000, выделяются строки, в которых за-

регистрировано перемещение светового пятна, и в каждой строке определяется положение изображения щели методом вычисления “центра тяжести” сигналов, превышающих порог, отсекающий шумовую дорожку. Для повышения точности предварительно изучается распределение чувствительностей и темновых сигналов по пикселям линейки и в сигналы до вычисления “центра тяжести” вводятся соответствующие поправки. Затем методом наименьших квадратов определяется средняя скорость движения изображения щели за все время регистрации (тренд). Набор значений разностей между зафиксированным положением “центра тяжести” в каждой строке и его положением в соответствии со средней скоростью представляет собой исходные данные для расчета дисперсии уклонений и их спектра мощности. Спектральный анализ осуществляется методом быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Таким образом, в приборе пространственно-временная дискретизация процесса осуществляется ПЗС-линейкой, амплитудная дискретизация (квантование) – АЦП, спектральный анализ – ЭВМ.

Цифровому анализу спектров сопутствуют два типа искажений – утечка части энергии сигнала через боковые максимумы функции отклика системы, обусловленная конечным размером анализируемой реализации, и “подмена (маскировка) частот”, возникающая при дискретизации процесса с недостаточной частотой. Для уменьшения эффекта подмены частот рекомендуется до дискретизации применять фильтры нижних частот, а эффект утечки может быть существенно подавлен применением при вычислениях взвешивающих функций с плавными спадами на концах [2–5].

Первая рекомендация в нашем случае реализуется при использовании больших времен накопления сигналов в ячейках линейки, вторая – применением функций “окон” при вычислении спектра.

Формально в соответствии с теоремой Котельникова максимальная частота  $f_b$  выборки определяет диапазон частот анализируемого процесса ( $f_N = f_b/2$ , частота Найквиста), в пределах которого спектр может быть получен без искажений. При использовании прибора должно быть априорно известно, что высшая частота анализируемого процесса не превышает частоты Найквиста. Однако для снижения погрешности оценок желательно, чтобы верхняя частота процесса была в 4–5 раз ниже частоты Найквиста, – при этом на период колебания самой высокой частоты в сигнале будет приходиться 7–9 отсчетов и его амплитуда будет определяться с погрешностью не более 5%. Необходимо также отметить, что хотя спектральная плотность рассчи-

тывается, начиная с  $k = 0$ , желательно, чтобы самая низкочастотная составляющая процесса тоже проявила себя достаточно наглядно: в полной длине реализации должны наблюдаться 3–5 периодов. При этом можно уже при ее предварительном анализе оценить, имеем ли мы дело с низкочастотным трендом или с установившимся процессом. Совершенно недопустимо подвергать анализу реализации, в которых укладывается меньше периода колебания наименьшей частоты. Такое поведение реализации следует трактовать как тренд, который должен быть исключен до вычисления спектра с помощью БПФ.

Если обозначить время накопления  $t_n$ , время считывания  $\tau$ , то шаг дискретизации по времени будет равен  $\Delta t = t_n + \tau$  и при длительности зарегистрированной реализации  $T$  число отсчетов процесса составит  $N = T/\Delta t$ , частота дискретизации  $f_b = N/T = 1/\Delta t$ , частота Найквиста  $f_N = N/2T = 1/2\Delta t$ , шаг дискретизации по частоте  $\Delta f = 1/T$ . Коэффициенты Фурье для каждой реализации вычисляются ЭВМ по алгоритму БПФ с использованием окна Ханна [3]

$$X_i(f_k) = 2\Delta t \sqrt{\frac{8}{3}} \sum_{n=0}^{N-1} x_{in} \left( 1 - \cos^2\left(\frac{\pi n}{N}\right) \right) \exp\left(-j \frac{2\pi k n}{N}\right), \quad (1)$$

где дискретные частоты  $f_k = k/N\Delta t$ , ( $k = 0, 1, \dots, T-1$ ),  $i$  – номер реализации ( $i_{\max} = I$ ),  $x_{in}$  – смещение центра тяжести светового пятна относительно текущего среднего в  $n$ -м отсчете  $i$ -й реализации, измеряемое целыми и дробными частями пикселей.

Спектральные составляющие односторонней спектральной плотности мощности колебаний находятся осреднением в соответствии с уравнением

$$G(f_k) = 0,45 \left( \frac{2}{N\Delta t} \right) \sum_{i=1}^I |X_i(f_k)|^2. \quad (2)$$

Отклик прибора на гармоническое колебание данной частоты зависит от вида функции окна и для прямоугольного окна имеет вид ядра Дирихле [5]

$$FP(\theta) = D(\theta) = \exp\left(j \frac{\theta}{2}\right) \frac{\sin\left(N \frac{\theta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}, \quad (3)$$

для окна Ханна – вид взвешенной суммы трех таких ядер

$$FH(\theta) = 0,5D(\theta) + 0,25 \left[ D\left(\theta - \frac{2\pi}{N}\right) + D\left(\theta + \frac{2\pi}{N}\right) \right]. \quad (4)$$

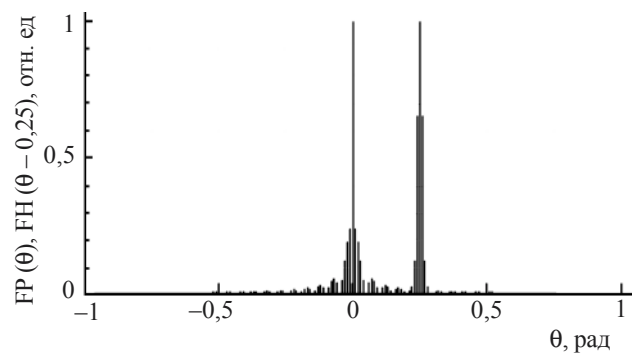


Рис. 2. Отклик на гармонический сигнал для прямоугольного окна (1) и окна Ханна (2).

Обе функции показаны на рис. 2 (вторая функция для наглядности сдвинута на  $\pi/4$ ).

Следует отметить, что в тех редких случаях, когда в реализации укладывается целое число периодов гармонического сигнала, модуляционные составляющие на частотах, отличных от частоты сигнала, пропадают.

Разрешение спектральных составляющих с близкими частотами, определяемое по условию образования провала между соответствующими отсчетами в спектре, составляет  $\Delta f_R = (2 - 2,5)\Delta f$ .

Экспериментальная проверка работы прибора проводилась с зеркалом диаметром 50 мм, расположенным на расстоянии 250 мм от объектива. Для уменьшения влияния “посторонних” вибраций на результаты измерений прибор располагался на плите массой около 1 т, помещенной на песчаную подушку, которая покоилась на основании, не связанном со стенами здания.

Первый этап работы состоял в определении повторяемости вычисленного положения “центра тяжести” при неподвижном зеркале и при изменении сигналов и отношения сигнал/шум путем изменения времен накопления в пределах 10–400 мкс.

При этом было установлено, что среднеквадратическое значение относительной погрешности определения “центра тяжести” неподвижного пятна в долях шага линейки  $d$  при изменении отношения сигнала к шуму в пределах 15–250 подчиняется зависимости

$$\sigma_d/d = 2,5/(U_{\max}/\sigma_n), \quad (5)$$

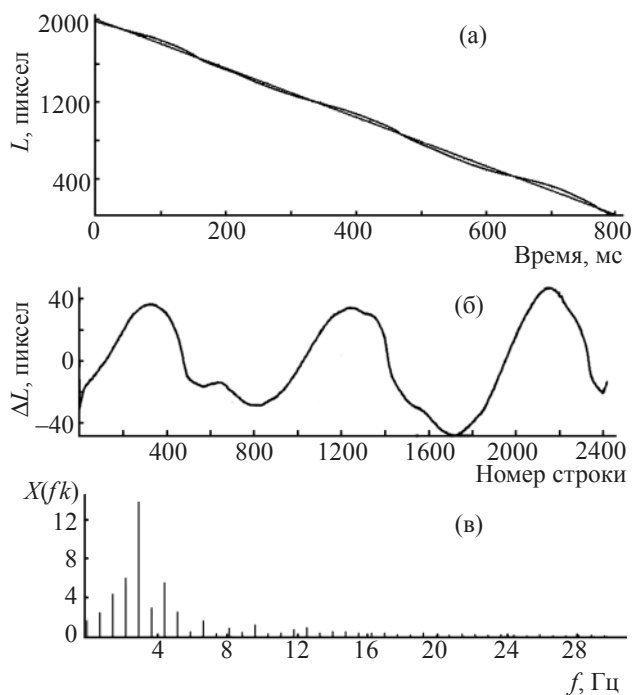
где  $U_{\max}$  – сигнал в максимуме отклика,  $\sigma_n$  – среднеквадратическое значение шума чувствительных элементов линейки при данном времени накопления. Дальнейшее увеличение отношения сигнал/шум до значений 1500 не приводило к снижению погрешности определения центра тяжести пятна. Анализ

показал, что в нашем случае это ограничение обусловлено остаточной нестабильностью уровня темновых сигналов линейки.

Учитывая, что  $d$  в угловой мере соответствует развороту зеркала на  $0,67''$ , получаем оценку достигнутой пороговой чувствительности не более  $0,007''$ .

На втором этапе работы использовалось зеркало, которое приводилось во вращение двигателем, причем выходной вал двигателя вращался неравномерно со средней скоростью примерно равной  $1800''/с$ . Время прохождения пятном полной длины линейки составляло  $0,8$  с. Время накопления устанавливалось равным  $100$  мкс. Временная зависимость текущих положений центров тяжести светового пятна  $L$  в целых и дробных частях числа пикселей, отсчитываемых от 2048-го элемента, с которого начиналась регистрация движения пятна в данном опыте, показана на графике рис. 3а. Та же зависимость с исключенным текущим средним  $\Delta L$  показана на рис. 3б, спектр отклонений – на рис. 3в.

Если скорость движения зеркала невелика, то диаметр зеркала может составлять лишь долю от диаметра пучка, выходящего из объектива автоколлиматора, например,  $15$  мм. При этом для получе-

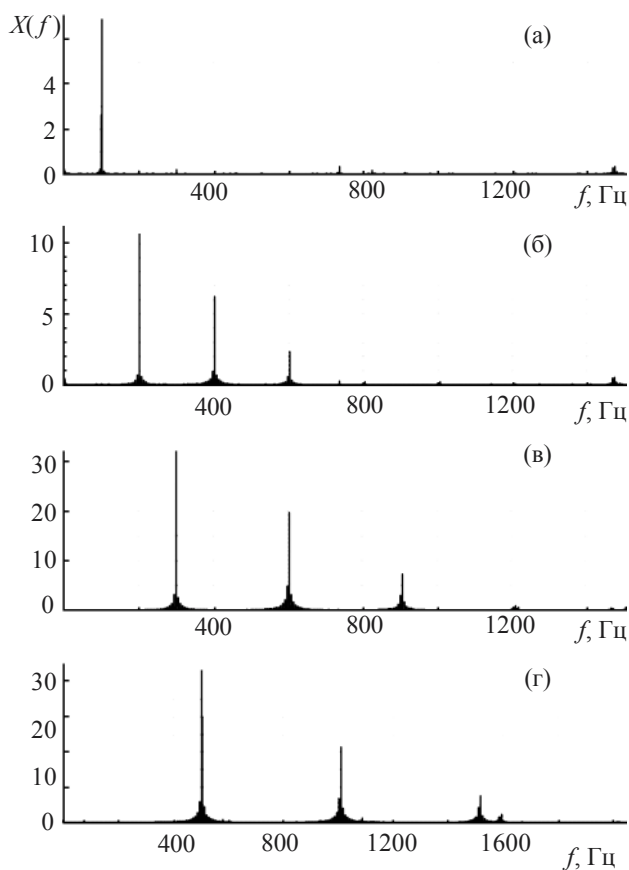


**Рис. 3.** Траектория движения (а, б) и спектр колебания движущегося пятна (в). Пояснения см. в тексте.

ния приемлемых значений сигнала придется увеличить время накопления до  $200$ – $300$  мкс. Малый диаметр зеркала может потребоваться при использовании автоколлиматора в качестве виброметра, измеряющего характеристики движения объекта малой массы.

Проверка работоспособности прибора как частотного анализатора имитировалась анализом спектра флюктуаций излучения лампы накаливания, питаемой непосредственно от сети. Несмотря на то что постоянная составляющая сигнала в десятки раз превышает переменную составляющую, анализатор спектра показал четко выраженный пик на частоте  $F = 100$  Гц с разбросом не более  $0,5$  Гц (рис. 4а).

Была также проверена работа прибора при фиксации всплеск светодиода, питаемого от генератора через однополупериодный выпрямитель. Облучаемая часть ПЗС-линейки не изменяла своего положения. Обработке подвергались сигналы от одного из облученных пикселей. Время накопления составляло  $20$  мкс, что соответствовало частоте оп-



**Рис. 4.** Спектры излучения электрической лампы (а) и светодиода (б–г) для различных частот  $F$ . б –  $F = 200$  Гц, в –  $300$  Гц, г –  $500$  Гц. Пояснения см. в тексте.

роса 4,2 кГц. При этом, как уже указывалось, наибольшая частота процесса не должна превышать 2,16 кГц. На рис. 4б–4г показаны соответственно спектры всплесков для частот 200, 300 и 500 Гц.

Как видно из графиков, в спектре уверенно фиксируется 5-я гармоника сигнала, амплитуда которой составляет 1/15 от амплитуды 1-й гармоники. Обратим внимание, что на рис. 4г на частоте около 50 Гц появляется слабый ложный максимум, обусловленный эффектом маскирования, так как 5-я гармоника 500-герцового сигнала (2,5 кГц) превышает ограничение 2,16 кГц. Отметим, что спектр колебаний излучения электрической лампы практически не содержит модуляционных составляющих.

Расчет оптики для автоколлиматора выполнен Г.И. Цукановой, конструирование С.Н. Мартыновым и В.А. Каринским, фотоприемник и интерфейс

к нему разработаны и изготовлены НПП “Заряд-Т” под руководством В.О. Тимофеева. Всем им авторы приносят свою благодарность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Мирошников М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1977. 600 с.
2. *Мирский Г.Я.* Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. М.: Энергия, 1972. 655 с.
3. *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
4. *Отнес Р., Эноксон Л.* Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 430 с.
5. *Харрис Ф.Дж.* Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. 1978. Т. 66. С. 60–96.